INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
MINISTERIO DE AGRICULTURA

100 AÑOS DEL CULTIVO DE ARROZ EN CHILE

En un contexto internacional 1920 – 2020

TOMO I

EDITORES
MARIO PAREDES C.,
VIVIANA BECERRA V.,
GABRIEL DONOSO Ñ.

ISSN 0717-4713

COLECCION LIBROS INIA – 40

100 AÑOS DEL CULTIVO DEL ARROZ EN CHILE EN UN CONTEXTO INTERNACIONAL 1920-2020

TOMO I

Editores

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ.

Ministerio de Agricultura
Gobierno de Chile
INIA
FIA
Fundación para la Innovación Agraria

Chillán, Chile, mayo 2021.

COLECCIÓN DE LIBROS INIA - 40
100 AÑOS DEL CULTIVO DEL ARROZ EN CHILE EN UN CONTEXTO INTERNACIONAL. 1920-2020.
TOMO I

Editores
Mario Paredes C., Ingeniero Agrónomo, M. Sc. Mejoramiento Vegetal, M. Sc. Genética, Ph. D. Genética.
Viviana Becerra V., Ingeniera Agrónoma, M. Sc. Genética y Mejoramiento Vegetal.
Gabriel Donoso Ñ., Bioquímico, Dr. Ciencias Biológicas.

Edición periodística y bibliográfica
Rocío Sasmay M.
Hugo Rodríguez A.

Director Nacional INIA
Pedro Bustos V.

Diagramación e impresión
Trama Impresores S.A.
Cantidad de ejemplares: 100

Cita bibliográfica correcta:
Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G. (eds.) 2021. 100 años del cultivo del arroz en Chile en un contexto internacional. 1920-2020. Tomo I. Libro INIA N° 40, 388 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán. Chile.

Inscripción registro de propiedad intelectual Tomo I, N° 2021-A-3776
ISSN: 0717-4713
ISBN Obra Completa: 978-956-7016-50-1
ISBN Tomo I: 978-956-7016-51-8

La presente publicación reúne y sistematiza un conjunto de información técnica relacionada con el cultivo del arroz e incluye resultados obtenidos en el proyecto: "Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz en Chile, una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de este cultivo frente al cambio climático global", realizado entre los años 2017-2020, con el apoyo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA).

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente y editores.
© 2021. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu, Ministerio de Agricultura. Avda. Vicente Méndez 515, fono (56) 42 220 6800, Chillán, Chile.

Las marcas, nombres comerciales y principios activos de productos y empresas mencionadas en este libro, se incluyen para describir temas específicos y no representan recomendación de INIA.

Foto portada y texto: editores.
Chillán, Chile, mayo de 2021.

100 AÑOS DEL CULTIVO DEL ARROZ EN CHILE EN UN CONTEXTO INTERNACIONAL 1920-2020

TOMO I

Editores

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ.

Ministerio de Agricultura
Gobierno de Chile
INIA
FIA
Fundación para la Innovación Agraria

Chillán, Chile, mayo 2021.

COLECCIÓN DE LIBROS INIA - 40
100 AÑOS DEL CULTIVO DEL ARROZ EN CHILE EN UN CONTEXTO INTERNACIONAL. 1920-2020.
TOMO I

Editores
Mario Paredes C., Ingeniero Agrónomo, M. Sc. Mejoramiento Vegetal, M. Sc. Genética, Ph. D. Genética.
Viviana Becerra V., Ingeniera Agrónoma, M. Sc. Genética y Mejoramiento Vegetal.
Gabriel Donoso Ñ., Bioquímico, Dr. Ciencias Biológicas.

Edición periodística y bibliográfica
Rocío Sasmay M.
Hugo Rodríguez A.

Director Nacional INIA
Pedro Bustos V.

Diagramación e impresión
Trama Impresores S.A.
Cantidad de ejemplares: 100

Cita bibliográfica correcta:
Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G. (eds.) 2021. 100 años del cultivo del arroz en Chile en un contexto internacional. 1920-2020. Tomo I. Libro INIA N° 40, 388 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán. Chile.

Inscripción registro de propiedad intelectual Tomo I, N° 2021-A-3776
ISSN: 0717-4713
ISBN Obra Completa: 978-956-7016-50-1
ISBN Tomo I: 978-956-7016-51-8

La presente publicación reúne y sistematiza un conjunto de información técnica relacionada con el cultivo del arroz e incluye resultados obtenidos en el proyecto: "Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz en Chile, una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de este cultivo frente al cambio climático global", realizado entre los años 2017-2020, con el apoyo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA).

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente y editores.
© 2021. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu, Ministerio de Agricultura. Avda. Vicente Méndez 515, fono (56) 42 220 6800, Chillán, Chile.

Las marcas, nombres comerciales y principios activos de productos y empresas mencionadas en este libro, se incluyen para describir temas específicos y no representan recomendación de INIA.

Foto portada y texto: editores.
Chillán, Chile, mayo de 2021.

Autores de Capítulos

Aedo A., Ángela
Ingeniera agrónoma, BASF Chile.

Alfaro V., Marta
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora INIA, Chile.

Andres, André
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigador EMBRAPA Brasil.

Aravena C., Joel
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Ávila F., Patricio
Ingeniero agrónomo, M.Sc., SAG, Chile.

Badilla R., Nelso
Empresa de Asistencia Técnica Nelpa, San Carlos, Chile.

Becerra V., Viviana
Ingeniera agrónoma, M.Sc. Investigadora INIA Quilamapu, Chile.

Carracelas G., Gonzalo
Ingeniero agrónomo. M.Sc. Investigador INIA Tacuarembó, Uruguay.

Concenço, Germani
Ingeniero agrónomo, Dr. Investigador EMBRAPA Brasil.

Cruz G., Maribel
Ingeniera agrónoma, Ph.D., Investigadora FLAR, Colombia.

Cuadra, Santiago V.
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigadora Embrapa, Brasil.

da Silva, Leandro S.
Dr. Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

de Sousa, Rogério O.
Dr. Profesor, Universidad Federal de Pelotas, Brasil.

Donoso Ñ., Gabriel
Bioquímico, Dr. Investigador INIA Quilamapu, Chile.

Finot S., Víctor
Botánico, Dr. Ex Profesor Asociado, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.

Falcón E., María
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Fogliatto, Silvia
Ph.D., Universitá degli Studi di Torino, Italia.

Gepts, Paul
Ingeniero agrónomo, Ph.D., Distinguished Professor, University of California, Davis, U.S.A.

Godoy C., Eduardo
Empresa de Asistencia Técnica Marcel Ibañez, Parral, Chile.

Heinemann, Alexandre B.
Dr. Universidade Federal de Santa Maria. Brasil.

Henríquez S., Gonzalo
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Henríquez S., Ramón
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Hirzel C., Juan
Ingeniero agrónomo, Dr. Investigador INIA Quilamapu, Chile.

Hube S., Sara
Químico Analista, Investigadora INIA Remehue, Chile.

Ibáñez A., Marcelo
Empresa de Asistencia Técnica Marcelo Ibáñez, Parral, Chile.

Jofré S-G, Fernando
Ingeniero agrónomo. BASF Chile.

Lee, Sang-Bok
Professor and Rice Consultant, Korea International Cooperation Agency (KOICA), Corea.

Loaiza de la P., Katherine
Ingeniera en Alimentos, M.Sc., Investigadora FLAR-CIAT, Colombia.

Markus, Catarine
Ingeniero agrónomo, Ph.D., Profesora e Investigadora Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Marchesi G., Claudia
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora INIA Uruguay.

Marticorena G., Alicia
Botánica, M.Sc., Universidad de Concepción, Chile.

Maureira C., Manuel
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Mellado S., Jaime
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Méndez del V., Patricio
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigador Senior. CIRAD. Francia.

Merotto, Aldo
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Profesor e Investigador. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Nitsche M., Jorge
Ingeniero agrónomo, Asesor privado, Chile.

Olmos, Sofía
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora INTA, Argentina.

Pardo del C., Fernando
Ingeniero agrónomo. Asesor malherbología, Santiago, Chile.

Paredes C., Mario
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigador (R) INIA Quilamapu

Ramírez M., Eimmy
Bióloga, Dra. Universidad de Concepción, Chile.

Retamal P., Verónica
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Rodríguez R., Roberto
Profesor (R) Universidad de Concepción, Chile.

Salas B., Alexis
Bioquímico, Dr. Universidad de Concepción, Chile.

Salas C., Víctor
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Scivittaro, Walkyria Bueno
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora Embrapa, Brasil.

Silva L., Nicolás
Ingeniero agrónomo. Basf, Chile.

Toro Y., Alejandro
Ingeniero agrónomo, Corteva Agriscience, Chile.

Toro T., Mauricio
Ingeniero agrónomo. Consultor privado, Chile.

Uribe C., Hamil
Ingeniero Civil Agrícola, Dr. Investigador INIA Quilamapu, Chile.

Véliz P., Christian
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Vidotto, Francesco
Ph.D., Professor Universitá degli Studi di Torino, Italia.

Yáñez S., Jorge
Bioquímico, Dr. Profesor, Universidad de Concepción, Chile.

Abreviaturas y símbolos

Unidad	Símbolo
Día	d
Hora	h
Minuto	min
Segundo	s
Largo	l
Kilómetro	km
Metro	m
Centímetro	cm
Milímetro	mm
Metros cuadrados	m^2
Hectárea	ha
Temperatura	T
Grados Celsius	°C
Cantidad	n
Tonelada	t
Mol	mol
Kilogramo	kg
Gramo	g
Miligramos	mg
Micro	µ
Pico	p
Volumen	V
Hectólitro	hL
Litro	L
Mililitro	mL
Metros cúbicos	m^3
Litros por segundo	$L\ s^{-1}$
Metros cúbicos por segundo	$m^3\ s^{-1}$
Kilogramos por habitante por año	$kg\ hab^{-1}\ año^{-1}$
Milimoles por litro	$mmol\ L^{-1}$
Mililitros por 100 gramos	$mL\ 100\ g^{-1}$
Miligramos por kilo	$mg\ kg^{-1}$
Porcentaje	%
Caloría	cal
Kilo calorías	kcal

Fuente: Newell, N., Tiesinga, E. 2019. The international system unit (SI). National Institute of Standards and Technology. Special Publication 330. Le Système International d' Unités (SI). 122p. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.330-2019.

Agradecimientos

Los editores desean agradecer muy sinceramente el financiamiento de los proyectos que permitieron recolectar, sistematizar y generar la información publicada en este libro. Nuestro reconocimiento y gratitud a toda(o)s la(o)s autora(e)s que estuvieron dispuestos a compartir su conocimiento y a participar en este trabajo; al personal de las bibliotecas que nos permitieron recopilar parte de la información presentada, especialmente a la Biblioteca Nacional de Chile, Biblioteca Central del INIA, Bibliotecas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de Concepción y la Universidad de Talca y al personal de las empresas Tucapel S.A., Carozzi S.A., Basf Chile, Nestlé Chile S.A., Asociaciones de Agricultores, Servicios de Asistencia Técnica (SAT), ODEPA, FIA, INDAP, SAG, y a las autoridades, profesionales, colegas que revisaron el texto, ayudantes de investigación y operarios del INIA que respaldaron este trabajo.

Finalmente, un especial agradecimiento a las personas que estuvieron incondicionalmente acompañándonos en la preparación de este trabajo como nuestros padres, esposas, hijos, yernos, nueras y nietos.

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ.

Editores

Índice

Prólogo INIA 9

Prólogo FIA 11

TOMO I: Origen, Diseminación, Diversidad, Clima, Suelo, Tolerancia a Frío, Calidad, Producción , Comercialización y Certificación del Arroz. 15

SECCIÓN I. ORIGEN, DISEMINACION Y DIVERSIDAD DEL ARROZ 17

Capítulo 1. Origen del arroz
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Paul Gepts, Gabriel Donoso Ñ. 18

Capítulo 2. Diseminación del cultivo del arroz desde su centro de origen al mundo
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Paul Gepts, Gabriel Donoso Ñ. 73

Capítulo 3. Diversidad y estructura genética del germoplasma de arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile
Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Alexis Salas B., Gabriel Donoso Ñ. 125

SECCIÓN II. CLIMA Y SUELO 144

Capítulo 4. Clima de zonas productoras de arroz en el mundo
Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G., Claudia Marchesi G. 146

Capítulo 5. Influencia del clima en el desarrollo de la planta de arroz en Chile: el cultivo de arroz más austral del mundo
Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G., Claudia Marchesi G. 162

Capítulo 6. Los suelos arroceros chilenos
Juan Hirzel C. 180

SECCIÓN III. TOLERANCIA A FRÍO 186

Capítulo 7. Tolerancia al frío en el cultivo del arroz en el mundo
Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Maribel Cruz G. 188

Capítulo 8. Estudio de la tolerancia al frío del arroz en Chile
Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Sang Bok- Lee. 215

SECCIÓN IV. CALIDAD 248

Capítulo 9. Calidad del grano de arroz
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Katherine Loaiza de la P. 250

Capítulo 10. Calidad del arroz en Chile
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. 280

SECCIÓN V. PRODUCCIÓN, COMERCIALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE SEMILLAS 300

Capítulo 11. Producción y comercialización mundial del arroz
Patricio Méndez del V. 302

Capítulo 12. Historia de la producción de arroz en Chile. 1920-2020
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. 314

Capítulo 13. Certificación de semilla de arroz en Chile
Patricio Ávila F. 380

Prólogo

Al cumplirse 100 años desde los primeros intentos por introducir e iniciar la producción de arroz en Chile, INIA entrega este libro a la comunidad, que recoge antecedentes mundiales y nacionales sobre la especie, los esfuerzos y avances alcanzados en investigación y desarrollo durante este período.

El cultivo del arroz en Chile se inició en la zona centro norte, por el interés de un grupo de agricultores visionarios que apostaron por la posibilidad de producirlo, en momentos en que el mundo enfrentaba una guerra y la escasez de alimentos. La decisión de estos pioneros no estuvo exenta de problemas, ya que debieron enfrentar el desconocimiento de la planta, como también las normas técnicas de producción en un ambiente adverso. Sin embargo, dado su entusiasmo y perseverancia, pronto empezaron a ver los primeros resultados positivos y a desarrollar una nueva industria alrededor del arroz. Pasada la primera década, el arroz se convirtió en una alternativa productiva, especialmente en suelos con limitaciones que no eran utilizados para la siembra de otros cereales. De esta manera, empezó a abastecer las necesidades internas y por breve tiempo, pudo exportar parte de la producción nacional. Sin embargo, pronto aparecieron los problemas asociados al uso intensivo del suelo, falta de rotaciones, escaso uso de fertilizantes y la alta infestación de malezas, carentes de un control adecuado. Este panorama desfavorable, motivó a agricultores a explorar nuevas zonas potenciales para el cultivo, esta vez, en la zona centro sur del país.

A medida que el cultivo de arroz alcanzaba un mayor desarrollo, el Estado creó el Ministerio de Agricultura y una institucionalidad agrícola para el país, estableciendo Estaciones Experimentales en varias regiones. Éstas iniciaron los trabajos que dieron origen a las primeras variedades. La creación del INIA en 1964, permitió continuar el trabajo iniciado por el Ministerio de Agricultura, a través del programa de arroz, que incluyó mejoramiento genético, el desarrollo de prácticas culturales asociadas a las nuevas variedades y la difusión de los resultados a los agricultores y empresas asociadas al rubro.

Desde su creación, INIA ha sido un soporte invaluable para el desarrollo del cultivo del arroz en el país, manteniendo de manera ininterrumpida un programa de I+D que, desde principios de la década de 1980, se ha desarrollado en estrecha colaboración con los principales centros internacionales de investigación, el sector productivo nacional y con el co-financiamiento de diversas fuentes nacionales e internacionales.

La investigación realizada ha generado un cúmulo de información que, a través de este libro, se pone a disposición de la comunidad nacional e internacional. Algunas temáticas nacionales tienen una revisión de los avances desarrollados a nivel internacional, lo que permitirá cuantificar las brechas de nuestro conocimiento actual para diseñar estrategias y lograr los objetivos actuales y futuros.

El arroz producido en Chile es único, no sólo por ser la zona productiva más austral del mundo, sino porque crece en un ambiente con una baja incidencia de enfermedades y plagas, por su escasa aplicación de agroquímicos, por su grano largo-ancho, por el bajo contenido de panza blanca, su alto grado de transparencia, su contenido de amilosa medio y su baja temperatura de gelatinización, factores, todos, que le permiten diferenciarse de otros arroces producidos en el mundo.

Un factor de gran relevancia es la necesidad de mantener y reforzar la alianza de INIA con las empresas privadas para enfrentar los actuales y futuros desafíos como el cambio climático, aumento de producción, cambios en la estructura del empleo, incorporación de nuevas tecnologías, formas de gestión de las empresas y las nuevas exigencias de los consumidores como atributos especiales de calidad, inocuidad, trazabilidad y el respeto por el medio ambiente. Todos ellos deberán conjugarse para seguir asegurando la misión institucional de garantizar la generación de alimentos en nuestro país.

Pedro Bustos Valdivia

Director Nacional de INIA

Prólogo

En la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) buscamos contribuir a la solución eficiente de los desafíos estratégicos más importantes del sector silvoagropecuario y de la cadena agroalimentaria asociada, por medio del fomento, articulación y difusión tecnológica de procesos de innovación orientados al desarrollo sustentable.

Estos desafíos se pueden resumir en adaptación al cambio climático y eficiencia hídrica; el desarrollo de mercados innovadores y los procesos innovadores. En estas tres aristas el sector arrocero nacional ha cumplido un rol fundamental para la agricultura a nivel nacional, al ser un producto único, con excepcionales características que lo hace diferenciarse de la oferta extranjera.

No podemos dejar de mencionar que el arroz es un alimento fundamental para la mayoría de la población mundial y que, en este contexto, Chile es el lugar más austral del mundo donde se cultiva. La producción nacional se distribuye desde la comuna de Linares en la Región del Maule, hasta la comuna de San Carlos en la Región de Ñuble.

Sin embargo, es un cultivo que requiere mucha agua para su producción, por lo que su continuidad puede verse amenazada, debido a la disminución de precipitaciones producto del cambio climático. Frente a este actual escenario, los esfuerzos deben ir en generar innovaciones que ayuden a solucionar las carencias relacionadas al uso de tecnologías de riego, disponibilidad de variedades que permitan un menor uso del recurso hídrico, entre otros aspectos que logren dar a los productores los conocimientos y prácticas necesarias, para hacerlos más competitivos.

En este sentido, queremos destacar el importante trabajo realizado con esta publicación, liderada por INIA, que sabemos será un aporte inmenso al sector arrocero. Y desde FIA queremos destacar el rol clave y necesario en torno a la coordinación y articulación de actores del rubro, así como en la prospección, generación y fomento de innovaciones necesarias para aumentar la productividad del cultivo.

Seguiremos trabajando para contribuir en hacer del rubro arrocero un sector competitivo, sustentable y rentable, y un dinamizador del desarrollo de los territorios donde se cultiva, aportando a una mejora en las condiciones de vida de los agricultores y sus familias vinculadas a esta actividad productiva y económica.

Álvaro Eyzaguirre Pepper

Director ejecutivo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA)

Proyectos que contribuyeron al desarrollo de este libro

Programa de Mejoramiento de Arroz-INIA. Subsecretaria de Agricultura. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.

Fortalecimiento del programa de mejoramiento genético de arroz y manzanos: Desarrollo de germoplasma tolerante a frío y resistente a venturia mediante el uso de herramientas moleculares. Programa Capital Humano de Desarrollo Avanzado (Ex Bicentenario de Ciencia y Tecnología). Inserción de investigadores/as postdoctorales en la Academia. Mario Paredes C. CONICYT- Banco Mundial. 2007-2009.

Characterization of tolerant and susceptible rice genotypes to low temperatures at the vegetative and reproductive stage: An essential and complementary step for marker assisted selection (MAS) in a rice breeding program. Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ. FONDECYT REGULAR Nº 1110405. 2011-2013.

Potentiality of mineralizable nitrogen in paddy rice soils of Chile. Juan Hirzel C. FONDECYT Iniciación, CONICYT. 2011-2012.

Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Huella del agua en arroz. Hamil Uribe C., Felipe Riquelme. Subsecretaria de Agricultura. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 2012-2013.

Apoyo a la formación de Redes Internacionales entre Centros de Investigación. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Julio Kalazich B., Pablo Grau B. Cooperación Internacional CONICYT. 2012-2013.

Programa inversiones en el programa de arroz. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. Reforzamiento de programas de investigación. INIA. 2012-2013.

Convenio apoyo a la competitividad del sector arrocero. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Riquelme S., Jorge González U. Subsecretaria de Agricultura. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 2012-2013.

Nuevas estrategias en la generación de variedades de arroz tolerantes a frío y resistentes a herbicidas. Fase I. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Javier Chilian, Fernando Garrido P. (Lorena Barra), Alvaro Vega S., Haroldo Salvo G., Carlos Fernández B. FONDEF 1OI1183. 2010-2011. Co-Financiamiento. Empresa Tucapel, S.A., Empresa Carozzi, S.A., Basf-Chile, INIA.

Nuevas estrategias en la generación de variedades de arroz tolerantes a frío y resistentes a herbicidas. Fase II. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Juan Hirzel C., Hamil Uribe C., Alvaro Vega S., Fernando Garrido P. FONDEF D10E1183. 2015-2018. Co-Financiamiento. Empresa Tucapel, S.A., Empresa Carozzi, S.A., Basf-Chile, INIA.
Evaluación de los niveles de arsénico en el arroz comercializado en Chile: una estrategia

para promover la inocuidad de los alimentos, salud de la población, sustentabilidad y competitividad de cultivo. INIA, Asociados: Subsecretaria de Agricultura; Asociación Gremial de Arroceros de Unicavén; Asociación Gremial de Comités Campesinos Rubro Arroz; Comité Campesino El Crucero de Buli; Comité Campesino Productores de Arroz Millauquén Unido; Comité Campesino Arrocero Otingue, Belén y Flor de Ñiquén. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Juan Hirzel C. (INIA), Jorge Yáñez S. (Universidad de Concepción). INNOVA Chile 15BP-45394. 2015-2017.

Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz en Chile, una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de este cultivo frente al cambio climático global. INIA. Empresas asociadas: Tucapel S.A.; Carozzi, S.A.; Asociación Gremial de Arroceros de Unicavén; Comité Campesino El Crucero de Buli; Comité de jóvenes Campesinos Productores de Arroz; Comité Campesino Arrocero Otingue, Belén y Flor de Ñiquén. Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Hamil Uribe C., Lorenzo León G., Jorge González U. (INIA). FIA PYT-2017-0190. 2017-2020.

Validación de estrategias de riego para el cultivo del arroz, para una producción eficiente y competitiva de menor impacto ambiental con productores familiares de Colombia, Perú y Chile. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Marta Alfaro V., Sara Hube S., Juan Hirzel C., Hamil Uribe C., Jorge González U. INIA Chile. FONTAGRO. 2018-2021.

Generación de un sistema de producción de arroz inocuo, con un menor uso de agua y basado en una evaluación de riesgo. Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Yáñez S., Eimmy Ramírez M., Juan Hirzel C., Hamil Uribe C., Gustavo Sotomayor D. INIA, Universidad de Concepción. Instituciones asociadas: Achipia, Tucapel S.A., Nestlé Chile S.A. FONDEF IT 19I0023. 2020-2022.

Autores de Capítulos

Aedo A., Ángela
Ingeniera agrónoma, BASF Chile.

Alfaro V., Marta
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora INIA, Chile.

Andres, André
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigador EMBRAPA Brasil.

Aravena C., Joel
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Ávila F., Patricio
Ingeniero agrónomo, M.Sc., SAG, Chile.

Badilla R., Nelso
Empresa de Asistencia Técnica Nelpa, San Carlos, Chile.

Becerra V., Viviana
Ingeniera agrónoma, M.Sc. Investigadora INIA Quilamapu, Chile.

Carracelas G., Gonzalo
Ingeniero agrónomo. M.Sc. Investigador INIA Tacuarembó, Uruguay.

Concenço, Germani
Ingeniero agrónomo, Dr. Investigador EMBRAPA Brasil.

Cruz G., Maribel
Ingeniera agrónoma, Ph.D., Investigadora FLAR, Colombia.

Cuadra, Santiago V.
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigadora Embrapa, Brasil.

da Silva, Leandro S.
Dr. Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

de Sousa, Rogério O.
Dr. Profesor, Universidad Federal de Pelotas, Brasil.

Donoso Ñ., Gabriel
Bioquímico, Dr. Investigador INIA Quilamapu, Chile.

Finot S., Víctor
Botánico, Dr. Ex Profesor Asociado, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.

Falcón E., María
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Fogliatto, Silvia
Ph.D., Universitá degli Studi di Torino, Italia.

Gepts, Paul
Ingeniero agrónomo, Ph.D., Distinguished Professor, University of California, Davis, U.S.A.

Godoy C., Eduardo
Empresa de Asistencia Técnica Marcel Ibañez, Parral, Chile.

Heinemann, Alexandre B.
Dr. Universidade Federal de Santa Maria. Brasil.

Henríquez S., Gonzalo
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Henríquez S., Ramón
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Hirzel C., Juan
Ingeniero agrónomo, Dr. Investigador INIA Quilamapu, Chile.

Hube S., Sara
Químico Analista, Investigadora INIA Remehue, Chile.

Ibáñez A., Marcelo
Empresa de Asistencia Técnica Marcelo Ibáñez, Parral, Chile.

Jofré S-G, Fernando
Ingeniero agrónomo. BASF Chile.

Lee, Sang-Bok
Professor and Rice Consultant, Korea International Cooperation Agency (KOICA), Corea.

Loaiza de la P., Katherine
Ingeniera en Alimentos, M.Sc., Investigadora FLAR-CIAT, Colombia.

Markus, Catarine
Ingeniero agrónomo, Ph.D., Profesora e Investigadora Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Marchesi G., Claudia
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora INIA Uruguay.

Marticorena G., Alicia
Botánica, M.Sc., Universidad de Concepción, Chile.

Maureira C., Manuel
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Mellado S., Jaime
Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, Chile.

Méndez del V., Patricio
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigador Senior. CIRAD. Francia.

Merotto, Aldo
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Profesor e Investigador. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Nitsche M., Jorge
Ingeniero agrónomo, Asesor privado, Chile.

Olmos, Sofía
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora INTA, Argentina.

Pardo del C., Fernando
Ingeniero agrónomo. Asesor malherbología, Santiago, Chile.

Paredes C., Mario
Ingeniero agrónomo, Ph.D. Investigador (R) INIA Quilamapu

Ramírez M., Eimmy
Bióloga, Dra. Universidad de Concepción, Chile.

Retamal P., Verónica
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Rodríguez R., Roberto
Profesor (R) Universidad de Concepción, Chile.

Salas B., Alexis
Bioquímico, Dr. Universidad de Concepción, Chile.

Salas C., Víctor
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Scivittaro, Walkyria Bueno
Ingeniera agrónoma, Ph.D. Investigadora Embrapa, Brasil.

Silva L., Nicolás
Ingeniero agrónomo. Basf, Chile.

Toro Y., Alejandro
Ingeniero agrónomo, Corteva Agriscience, Chile.

Toro T., Mauricio
Ingeniero agrónomo. Consultor privado, Chile.

Uribe C., Hamil
Ingeniero Civil Agrícola, Dr. Investigador INIA Quilamapu, Chile.

Véliz P., Christian
Empresa de Asistencia Técnica, AgroParral, Chile.

Vidotto, Francesco
Ph.D., Professor Universitá degli Studi di Torino, Italia.

Yáñez S., Jorge
Bioquímico, Dr. Profesor, Universidad de Concepción, Chile.

Abreviaturas y símbolos

Unidad	Símbolo
Día	d
Hora	h
Minuto	min
Segundo	s
Largo	l
Kilómetro	km
Metro	m
Centímetro	cm
Milímetro	mm
Metros cuadrados	m^2
Hectárea	ha
Temperatura	T
Grados Celsius	°C
Cantidad	n
Tonelada	t
Mol	mol
Kilogramo	kg
Gramo	g
Miligramos	mg
Micro	µ
Pico	p
Volumen	V
Hectólitro	hL
Litro	L
Mililitro	mL
Metros cúbicos	m^3
Litros por segundo	$L\ s^{-1}$
Metros cúbicos por segundo	$m^3\ s^{-1}$
Kilogramos por habitante por año	$kg\ hab^{-1}\ año^{-1}$
Milimoles por litro	$mmol\ L^{-1}$
Mililitros por 100 gramos	$mL\ 100\ g^{-1}$
Miligramos por kilo	$mg\ kg^{-1}$
Porcentaje	%
Caloría	cal
Kilo calorías	kcal

Fuente: Newell, N., Tiesinga, E. 2019. The international system unit (SI). National Institute of Standards and Technology. Special Publication 330. Le Système International d' Unités (SI). 122p. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.330-2019.

Agradecimientos

Los editores desean agradecer muy sinceramente el financiamiento de los proyectos que permitieron recolectar, sistematizar y generar la información publicada en este libro. Nuestro reconocimiento y gratitud a toda(o)s la(o)s autora(e)s que estuvieron dispuestos a compartir su conocimiento y a participar en este trabajo; al personal de las bibliotecas que nos permitieron recopilar parte de la información presentada, especialmente a la Biblioteca Nacional de Chile, Biblioteca Central del INIA, Bibliotecas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de Concepción y la Universidad de Talca y al personal de las empresas Tucapel S.A., Carozzi S.A., Basf Chile, Nestlé Chile S.A., Asociaciones de Agricultores, Servicios de Asistencia Técnica (SAT), ODEPA, FIA, INDAP, SAG, y a las autoridades, profesionales, colegas que revisaron el texto, ayudantes de investigación y operarios del INIA que respaldaron este trabajo.

Finalmente, un especial agradecimiento a las personas que estuvieron incondicionalmente acompañándonos en la preparación de este trabajo como nuestros padres, esposas, hijos, yernos, nueras y nietos.

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ.

Editores

Índice

Prólogo INIA 9

Prólogo FIA 11

TOMO I: Origen, Diseminación, Diversidad, Clima, Suelo, Tolerancia a Frío, Calidad, Producción , Comercialización y Certificación del Arroz. 15

SECCIÓN I. ORIGEN, DISEMINACION Y DIVERSIDAD DEL ARROZ 17

Capítulo 1. Origen del arroz
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Paul Gepts, Gabriel Donoso Ñ. 18

Capítulo 2. Diseminación del cultivo del arroz desde su centro de origen al mundo
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Paul Gepts, Gabriel Donoso Ñ. 73

Capítulo 3. Diversidad y estructura genética del germoplasma de arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile
Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Alexis Salas B., Gabriel Donoso Ñ. 125

SECCIÓN II. CLIMA Y SUELO 144

Capítulo 4. Clima de zonas productoras de arroz en el mundo
Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G., Claudia Marchesi G. 146

Capítulo 5. Influencia del clima en el desarrollo de la planta de arroz en Chile: el cultivo de arroz más austral del mundo
Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G., Claudia Marchesi G. 162

Capítulo 6. Los suelos arroceros chilenos
Juan Hirzel C. 180

SECCIÓN III. TOLERANCIA A FRÍO 186

Capítulo 7. Tolerancia al frío en el cultivo del arroz en el mundo
Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Maribel Cruz G. 188

Capítulo 8. Estudio de la tolerancia al frío del arroz en Chile
Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Sang Bok- Lee. 215

SECCIÓN IV. CALIDAD 248

Capítulo 9. Calidad del grano de arroz
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Katherine Loaiza de la P. 250

Capítulo 10. Calidad del arroz en Chile
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. 280

SECCIÓN V. PRODUCCIÓN, COMERCIALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE SEMILLAS 300

Capítulo 11. Producción y comercialización mundial del arroz
Patricio Méndez del V. 302

Capítulo 12. Historia de la producción de arroz en Chile. 1920-2020
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. 314

Capítulo 13. Certificación de semilla de arroz en Chile
Patricio Ávila F. 380

Prólogo

Al cumplirse 100 años desde los primeros intentos por introducir e iniciar la producción de arroz en Chile, INIA entrega este libro a la comunidad, que recoge antecedentes mundiales y nacionales sobre la especie, los esfuerzos y avances alcanzados en investigación y desarrollo durante este período.

El cultivo del arroz en Chile se inició en la zona centro norte, por el interés de un grupo de agricultores visionarios que apostaron por la posibilidad de producirlo, en momentos en que el mundo enfrentaba una guerra y la escasez de alimentos. La decisión de estos pioneros no estuvo exenta de problemas, ya que debieron enfrentar el desconocimiento de la planta, como también las normas técnicas de producción en un ambiente adverso. Sin embargo, dado su entusiasmo y perseverancia, pronto empezaron a ver los primeros resultados positivos y a desarrollar una nueva industria alrededor del arroz. Pasada la primera década, el arroz se convirtió en una alternativa productiva, especialmente en suelos con limitaciones que no eran utilizados para la siembra de otros cereales. De esta manera, empezó a abastecer las necesidades internas y por breve tiempo, pudo exportar parte de la producción nacional. Sin embargo, pronto aparecieron los problemas asociados al uso intensivo del suelo, falta de rotaciones, escaso uso de fertilizantes y la alta infestación de malezas, carentes de un control adecuado. Este panorama desfavorable, motivó a agricultores a explorar nuevas zonas potenciales para el cultivo, esta vez, en la zona centro sur del país.

A medida que el cultivo de arroz alcanzaba un mayor desarrollo, el Estado creó el Ministerio de Agricultura y una institucionalidad agrícola para el país, estableciendo Estaciones Experimentales en varias regiones. Éstas iniciaron los trabajos que dieron origen a las primeras variedades. La creación del INIA en 1964, permitió continuar el trabajo iniciado por el Ministerio de Agricultura, a través del programa de arroz, que incluyó mejoramiento genético, el desarrollo de prácticas culturales asociadas a las nuevas variedades y la difusión de los resultados a los agricultores y empresas asociadas al rubro.

Desde su creación, INIA ha sido un soporte invaluable para el desarrollo del cultivo del arroz en el país, manteniendo de manera ininterrumpida un programa de I+D que, desde principios de la década de 1980, se ha desarrollado en estrecha colaboración con los principales centros internacionales de investigación, el sector productivo nacional y con el co-financiamiento de diversas fuentes nacionales e internacionales.

La investigación realizada ha generado un cúmulo de información que, a través de este libro, se pone a disposición de la comunidad nacional e internacional. Algunas temáticas nacionales tienen una revisión de los avances desarrollados a nivel internacional, lo que permitirá cuantificar las brechas de nuestro conocimiento actual para diseñar estrategias y lograr los objetivos actuales y futuros.

El arroz producido en Chile es único, no sólo por ser la zona productiva más austral del mundo, sino porque crece en un ambiente con una baja incidencia de enfermedades y plagas, por su escasa aplicación de agroquímicos, por su grano largo-ancho, por el bajo contenido de panza blanca, su alto grado de transparencia, su contenido de amilosa medio y su baja temperatura de gelatinización, factores, todos, que le permiten diferenciarse de otros arroces producidos en el mundo.

Un factor de gran relevancia es la necesidad de mantener y reforzar la alianza de INIA con las empresas privadas para enfrentar los actuales y futuros desafíos como el cambio climático, aumento de producción, cambios en la estructura del empleo, incorporación de nuevas tecnologías, formas de gestión de las empresas y las nuevas exigencias de los consumidores como atributos especiales de calidad, inocuidad, trazabilidad y el respeto por el medio ambiente. Todos ellos deberán conjugarse para seguir asegurando la misión institucional de garantizar la generación de alimentos en nuestro país.

Pedro Bustos Valdivia

Director Nacional de INIA

Prólogo

En la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) buscamos contribuir a la solución eficiente de los desafíos estratégicos más importantes del sector silvoagropecuario y de la cadena agroalimentaria asociada, por medio del fomento, articulación y difusión tecnológica de procesos de innovación orientados al desarrollo sustentable.

Estos desafíos se pueden resumir en adaptación al cambio climático y eficiencia hídrica; el desarrollo de mercados innovadores y los procesos innovadores. En estas tres aristas el sector arrocero nacional ha cumplido un rol fundamental para la agricultura a nivel nacional, al ser un producto único, con excepcionales características que lo hace diferenciarse de la oferta extranjera.

No podemos dejar de mencionar que el arroz es un alimento fundamental para la mayoría de la población mundial y que, en este contexto, Chile es el lugar más austral del mundo donde se cultiva. La producción nacional se distribuye desde la comuna de Linares en la Región del Maule, hasta la comuna de San Carlos en la Región de Ñuble.

Sin embargo, es un cultivo que requiere mucha agua para su producción, por lo que su continuidad puede verse amenazada, debido a la disminución de precipitaciones producto del cambio climático. Frente a este actual escenario, los esfuerzos deben ir en generar innovaciones que ayuden a solucionar las carencias relacionadas al uso de tecnologías de riego, disponibilidad de variedades que permitan un menor uso del recurso hídrico, entre otros aspectos que logren dar a los productores los conocimientos y prácticas necesarias, para hacerlos más competitivos.

En este sentido, queremos destacar el importante trabajo realizado con esta publicación, liderada por INIA, que sabemos será un aporte inmenso al sector arrocero. Y desde FIA queremos destacar el rol clave y necesario en torno a la coordinación y articulación de actores del rubro, así como en la prospección, generación y fomento de innovaciones necesarias para aumentar la productividad del cultivo.

Seguiremos trabajando para contribuir en hacer del rubro arrocero un sector competitivo, sustentable y rentable, y un dinamizador del desarrollo de los territorios donde se cultiva, aportando a una mejora en las condiciones de vida de los agricultores y sus familias vinculadas a esta actividad productiva y económica.

Álvaro Eyzaguirre Pepper

Director ejecutivo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA)

Proyectos que contribuyeron al desarrollo de este libro

Programa de Mejoramiento de Arroz-INIA. Subsecretaria de Agricultura. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.

Fortalecimiento del programa de mejoramiento genético de arroz y manzanos: Desarrollo de germoplasma tolerante a frío y resistente a venturia mediante el uso de herramientas moleculares. Programa Capital Humano de Desarrollo Avanzado (Ex Bicentenario de Ciencia y Tecnología). Inserción de investigadores/as postdoctorales en la Academia. Mario Paredes C. CONICYT- Banco Mundial. 2007-2009.

Characterization of tolerant and susceptible rice genotypes to low temperatures at the vegetative and reproductive stage: An essential and complementary step for marker assisted selection (MAS) in a rice breeding program. Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ. FONDECYT REGULAR Nº 1110405. 2011-2013.

Potentiality of mineralizable nitrogen in paddy rice soils of Chile. Juan Hirzel C. FONDECYT Iniciación, CONICYT. 2011-2012.

Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Huella del agua en arroz. Hamil Uribe C., Felipe Riquelme. Subsecretaria de Agricultura. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 2012-2013.

Apoyo a la formación de Redes Internacionales entre Centros de Investigación. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Julio Kalazich B., Pablo Grau B. Cooperación Internacional CONICYT. 2012-2013.

Programa inversiones en el programa de arroz. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. Reforzamiento de programas de investigación. INIA. 2012-2013.

Convenio apoyo a la competitividad del sector arrocero. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Riquelme S., Jorge González U. Subsecretaria de Agricultura. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 2012-2013.

Nuevas estrategias en la generación de variedades de arroz tolerantes a frío y resistentes a herbicidas. Fase I. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Javier Chilian, Fernando Garrido P. (Lorena Barra), Alvaro Vega S., Haroldo Salvo G., Carlos Fernández B. FONDEF 1OI1183. 2010-2011. Co-Financiamiento. Empresa Tucapel, S.A., Empresa Carozzi, S.A., Basf-Chile, INIA.

Nuevas estrategias en la generación de variedades de arroz tolerantes a frío y resistentes a herbicidas. Fase II. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Juan Hirzel C., Hamil Uribe C., Alvaro Vega S., Fernando Garrido P. FONDEF D10E1183. 2015-2018. Co-Financiamiento. Empresa Tucapel, S.A., Empresa Carozzi, S.A., Basf-Chile, INIA.
Evaluación de los niveles de arsénico en el arroz comercializado en Chile: una estrategia

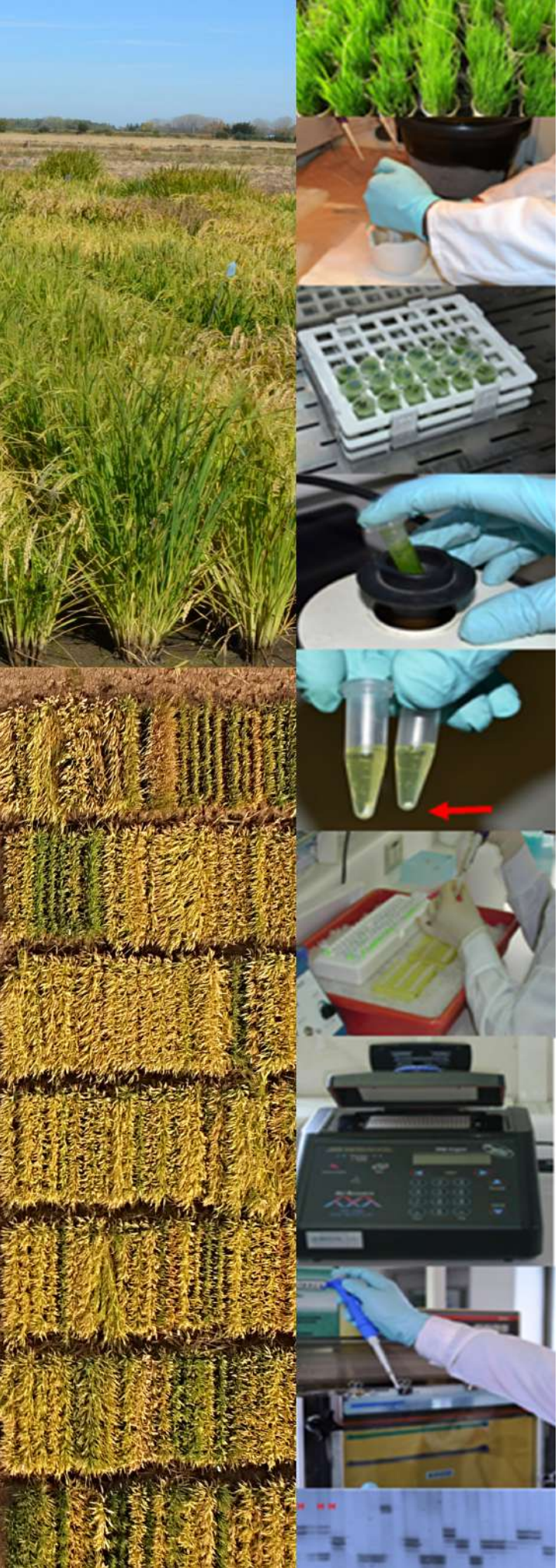
para promover la inocuidad de los alimentos, salud de la población, sustentabilidad y competitividad de cultivo. INIA, Asociados: Subsecretaria de Agricultura; Asociación Gremial de Arroceros de Unicavén; Asociación Gremial de Comités Campesinos Rubro Arroz; Comité Campesino El Crucero de Buli; Comité Campesino Productores de Arroz Millauquén Unido; Comité Campesino Arrocero Otingue, Belén y Flor de Ñiquén. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Juan Hirzel C. (INIA), Jorge Yáñez S. (Universidad de Concepción). INNOVA Chile 15BP-45394. 2015-2017.

Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz en Chile, una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de este cultivo frente al cambio climático global. INIA. Empresas asociadas: Tucapel S.A.; Carozzi, S.A.; Asociación Gremial de Arroceros de Unicavén; Comité Campesino El Crucero de Buli; Comité de jóvenes Campesinos Productores de Arroz; Comité Campesino Arrocero Otingue, Belén y Flor de Ñiquén. Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Hamil Uribe C., Lorenzo León G., Jorge González U. (INIA). FIA PYT-2017-0190. 2017-2020.

Validación de estrategias de riego para el cultivo del arroz, para una producción eficiente y competitiva de menor impacto ambiental con productores familiares de Colombia, Perú y Chile. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Marta Alfaro V., Sara Hube S., Juan Hirzel C., Hamil Uribe C., Jorge González U. INIA Chile. FONTAGRO. 2018-2021.

Generación de un sistema de producción de arroz inocuo, con un menor uso de agua y basado en una evaluación de riesgo. Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Yáñez S., Eimmy Ramírez M., Juan Hirzel C., Hamil Uribe C., Gustavo Sotomayor D. INIA, Universidad de Concepción. Instituciones asociadas: Achipia, Tucapel S.A., Nestlé Chile S.A. FONDEF IT 19I0023. 2020-2022.

ORIGEN, DISEMINACIÓN, DIVERSIDAD, CLIMA, SUELO, TOLERANCIA A FRÍO, CALIDAD, PRODUCCIÓN , COMERCIALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DEL ARROZ



SECCIÓN I. ORIGEN, DISEMINACIÓN Y DIVERSIDAD DEL ARROZ

Capítulo 1. Origen del Arroz

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Paul Gepts, Gabriel Donoso Ñ.

Especies y distribución geográfica

El arroz pertenece a la tribu Oryzeae, familia Poaceae, género *Oryza* y especie *sativa* (Vaughan, 1994). Existen dos especies cultivadas de arroz, el arroz asiático o arroz común (*Oryza sativa* L.) y el arroz africano (*Oryza glaberrima* Steud.). Ambas especies son diploides (2*n*=2*x*=24) y poseen un genoma del tipo AA. El género *Oryza* incluye 22 especies, entre silvestres y cultivadas, diploides (2*n*=2*x*=24) y tetraploides (2*n*=4*x*=48), y con diferentes tipos de genomas AA, BB, CC, BBCC, CCDD, EE, FF, GG, KKLL y HHJJ, las que están distribuidas en varios continentes (Ge et al., 1999; Vaughan et al., 2003) (Cuadro 1, Figura 1).

Cuadro 1. Clasificación de las especies de arroz y su distribución geográfica mundial.

Sección/Complejos/Especies	Tipo genoma	N° cromosomas	Tamaño genoma (Mbp)	Distribución geográfica
Sección *Oryza*				
Complejo *O. sativa*				
O. sativa L. (ssp. *japonica,* ssp. *indica)*	AA	24	420, 460	África, Centro y Sudamérica, Asia, Oceanía
O. glaberrima Steud.	AA	24	354	África
O. barthii A. Chev.	AA	24	411	África
O. glumaepatula Steud.	AA	24	464	Centro y Sudamérica
O. longistaminata A. Chev. et Roerh.	AA	24	352	África
O. meridionalis Ng	AA	24	435	Oceanía
O. nivara Sharma y Shastry.	AA	24	448	Asia
O. rufipogon Griff.	AA	24	439, 450	Centro y Sudamérica, Asia, Oceanía
Complejo *O. officinalis*				
O. punctata Kotschy ex Steud.	BB, BBCC	24, 48	423 (BB)	África
O. malampuzhaensis	BBCC	48	-	-
O. minuta J.S. Presl. Ex C.B. Presl.	BBCC	48	1124	Asia, Oceanía
O. eichingeri A. Peter.	CC	24	-	África, Asia
O. officinalis Wall ex Watt.	CC	24	653	Asia, Oceanía
O. rhizomatis Vaughan	CC	24	-	Asia
O. alta Swallen	CCDD	48	1124	Centro y Sudamérica

O. grandiglumis (D) Prodoehl	CCDD	48	-	Centro y Sudamérica
O. latifolia Desv.	CCDD	48	-	Centro y Sudamérica
O. australiensis Domin	EE	24	960	Oceanía
Sección Brachyantha				
O. brachyantha A. Chev. et Roehr.	FF	24	338	África
Sección Padia				
Complejo *O. granulata*				
O. granulata Nees et Am. Ex Watt.	GG	24	862	Asia
O. meyeriana (Zoll. et (Mor. Ex Steud.) Baill.)	GG	24	-	Asia
Complejo *O. ridleyi*				
O. longiglumis Jansen	HHJJ	48	-	Oceanía
O. ridleyi Hook, F.	HHJJ	48	1283	Asia, Oceanía
Complejo *O. schlechteria*				
O. schlechteri Pilger	KKLL	48	-	Oceanía
O. coartata Tateoka	KKLL	48	771	Asia

Fuente: OECD (1999); Li et al. (2000); Thomas et al. (2001); Vaughan y Morishima (2003); Shakiba y Eizenga (2014).

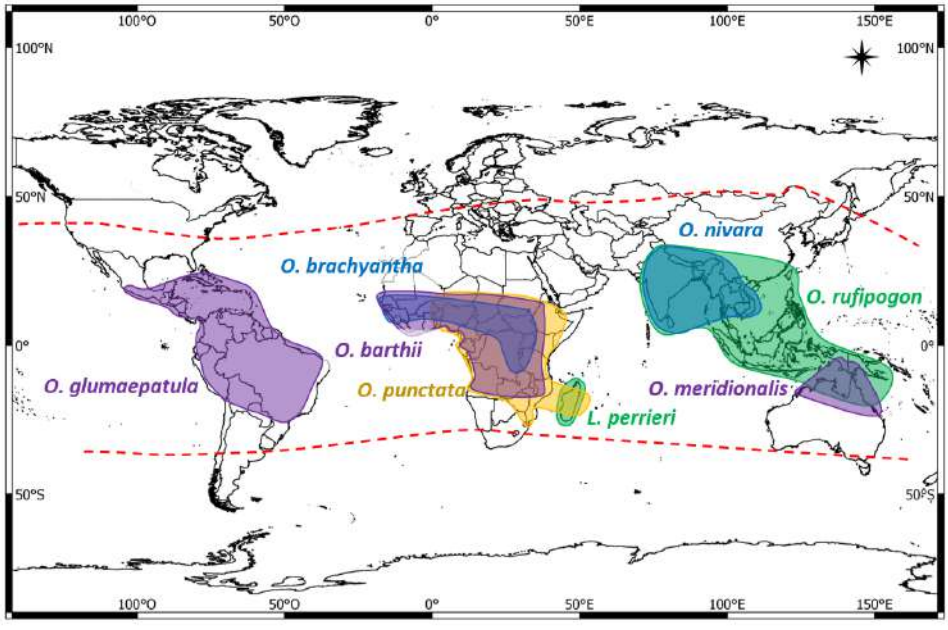


Figura 1. Distribución geográfica de algunas especies silvestres (Adaptado de Stein et al., 2018).

Originalmente, las especies de arroz se agrupaban en tres complejos, *O. sativa*, *O. officinalis* y *O. ridleyi*, dependiendo de su constitución genómica (Morishima y Oka, 1970). Es así como el complejo *O. sativa* estaba compuesto por especies diploides (AA), el complejo *O. officinalis* por especies diploides con constitución genómica BB, CC, EE y especies tetraploides con genomas BBCC, CCDD, y el complejo *O. ridleyi* con especies con genomas HHJJ. Recientemente, a esta agrupación se incorporaron dos nuevos complejos, *O. granulata* y *O. schlechteri*, cuyas especies poseen genomas GG y KKLL, respectivamente (Shakiba y Eizenga, 2014).

Antes del inicio de la agricultura (≈ 10.000 años a.C.), los cazadores-recolectores tenían la tradición de recolectar y consumir las plantas silvestres, incluyendo a los progenitores del arroz, en el hábitat natural donde crecían, por tal razón es muy probable que estos lugares (por ejemplo, China y el Occidente de África) sean las regiones donde se domesticaron y dieron origen a las especies cultivadas. Por otro lado, al pertenecer estas especies al acervo genético de los arroces cultivados, pueden ser relevantes para el mejoramiento genético de este cultivo. De ahí la importancia de conocer la distribución geográfica de los progenitores silvestres, los posibles centros de domesticación y los cambios ocurridos durante este proceso.

Las especies silvestres presentan una amplia diversidad genética y son una fuente potencial de genes para el mejoramiento de las especies cultivadas (Vaughan et al., 2003; Xu et al., 2012; Brozynska et al., 2016; Szareski et al., 2018; Stein et al., 2018). A pesar de esta situación, la transferencia de estos genes es lenta y compleja, por lo cual no es muy usada por los mejoradores. Esta complejidad en la transferencia de los genes se debe, principalmente, a su asociación con características agronómicas no deseadas, como granos pequeños y de baja calidad, planta alta, susceptibles al desgrane y bajo rendimiento (Shakiba y Eizenga, 2014).

Arroz asiático (*Oryza sativa* L.)

En el arroz asiático se distinguen dos subespecies *indica* y *japonica* y cinco tipos o grupos de arroz: *japonica* tropical, *japonica* templado, *aromatico*, *indica* y *aus* (Garris et al., 2005; Zhao, 2010; Civán et al., 2015), aunque algunos investigadores señalan que se podría incluir al tipo *rayada* como un nuevo grupo dentro de esta clasificación (Wang et al., 2014b).

Progenitores del arroz *japonica* y del *indica*

La información arqueológica y genética señala que el arroz *japonica* se originó de la especie silvestre *Oryza rufipogon* (*sensu stricto*) e *indica* de la especie silvestre *Oryza nivara* (Molina et al., 2011; Huang et al., 2012; Wang et al., 2014b; Wambugu et al., 2015; Kim et al., 2016). Además, se señala que ambas subespecies tuvieron más de un evento de domesticación, y que estos procesos pudieron haber ocurrido en forma independiente y en diferentes regiones geográficas (Fuller et al., 2009).

Otros investigadores señalan que ambas subespecies se derivaron de diferentes poblaciones del complejo *O. rufipogon* (Cheng et al., 2003; Li et al., 2006a; Zhu et al., 2007; Kim et al., 2016). En este contexto, se postula que el arroz *japonica* e *indica* se derivaron de diferentes poblaciones del complejo *O. rufipogon* (He et al., 2011; Huang et al., 2012; Yang et al., 2012a; Civán et al., 2015; Choi et al., 2017; Choi y Purugganan, 2018). Es así como el arroz *japonica* se habría originado primero y de una población específica de *O. rufipogon* (Or-III), ubicada en la región cercana al río Perlas (provincia de Guangxi) en el sur de China, y que el arroz *indica* se habría originado con posterioridad, de una población diferente de *O. rufipogon* (Or-I) ubicada en el sudeste y sur de Asia, producto de varios ciclos de introgresión con *japonica*. Este proceso de introgresión le habría permitido al arroz tipo *indica*, adquirir varios alelos importantes para su domesticación final (Huang et al., 2012). Los tipos *indica y japonica* presentan, además, dos haplotipos ancestrales diversos. Los haplotipos del arroz *indica* estaban presentes en los arroces del norte y este de India, y en el noroeste del sudes-

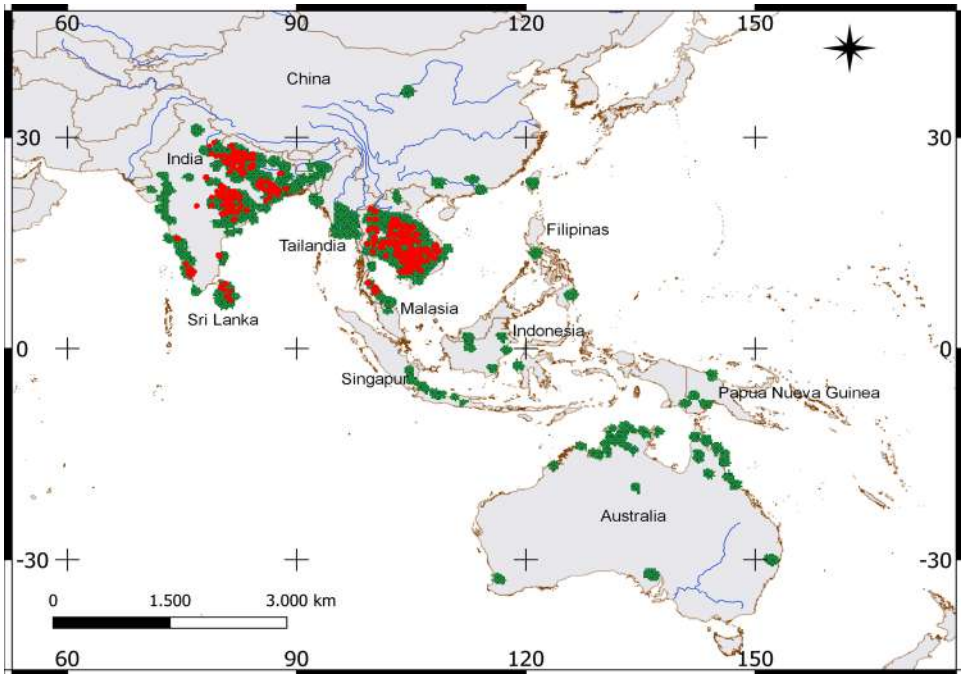


Figura 2. Distribución geográfica del progenitor silvestre del arroz tipo *japonica* (*O. rufipogon* (en verde)), y del arroz tipo *indica* (*O. nivara* (en rojo)) (Adaptado de Vincent et al., 2013).

te asiático, mientras que los haplotipos presentes en *japonica* se encuentran en los arroces del sur de China. Por otro lado, un tercer haplotipo (CC) no fue detectado en el material silvestre moderno, por lo cual se plantea que este haplotipo (CC) se habría extinguido en la región del Yangtze o en la parte baja de la costa oriental de China, entre Taiwán y Corea, que se sumergió a finales del Pleistoceno o comienzos del Holoceno debido al aumento del nivel del mar, producto del cambio climático (Londo et al., 2006).

Esta situación plantea que ambas subespecies tuvieron un proceso de domesticación diferente (Wang et al., 2014a; Tong et al., 2016). Este punto se ve reforzado debido a que ambas especies habitan en diferentes lugares: *O. nivara* se encuentra con mayor frecuencia en la región tropical de los monzones en la India, mientras *O. rufipogon* está distribuido, principalmente, en los ríos y valles del sudeste de Asia y en el sur de China (Fuller y Weisskopf, 2011). Sin embargo, también se plantea que en las épocas prehistóricas (entre 10 mil y 6 mil años atrás), *O. rufipogon* pudo haberse ubicado más al norte de China (Shandong) y más hacia el occidente y sur de India, debido a la presencia de condiciones climáticas más favorables para su crecimiento y desarrollo (Fuller y Weisskopf, 2011; Fuller et al., 2010b; Bellwood, 2011).

Además, *O. rufipogon* y *O. nivara* presentan diferencias en sus hábitos de crecimiento, hábitats de desarrollo y sistemas tempranos de explotación de estas plantas por parte de la población (Fuller y Qin, 2009). Es así como, *O. rufipogon* es una planta perenne, sensible al fotoperíodo, con un sistema de polinización cruzada, y un hábito de crecimiento acuático que habita, permanentemente, en los pantanos en la región baja y media del río Yangtze y con una escasa producción de semilla, debido a que gran parte de su energía la gasta en su largo período de crecimiento. Por el contrario, *O. nivara* es una planta anual, erecta, insensible al fotoperíodo, principalmente de autopolinización y hábito semi-acuático que habita en regiones geográficas que intercalan períodos inundados y sin inundación de la India y del sudeste de Asia (Li et al., 2006a; Vaughan et al., 2008a; Fuller y Qin, 2009). Esta situación habría llevado a los habitantes de esos lugares a utilizar diferentes estrategias para explotar estos recursos.

En el caso del *O. rufipogon*, la primera estrategia estuvo basada en la cosecha continua de la planta, usando posiblemente el sistema de ´ratooning`, es decir, cosechar la semilla y dejar a la planta para obtener un nuevo crecimiento y cosecha. La segunda estrategia se focalizó en la cosecha y siembra eventual de semilla en suelos no pantanosos, donde las condiciones climáticas y de cultivo permitieron imponer la selección de plantas de hábito de crecimiento anual con un menor crecimiento vegetativo y desgrane, un mayor rendimiento y tamaño de grano que caracterizan al arroz domesticado (Fuller y Qin, 2009; Fuller et al., 2009).

En el caso de *O. nivara*, como no estaba adaptada a condiciones pantanosas, crecía extensivamente en forma silvestre sin grandes limitaciones productivas, por lo cual, el proceso productivo se focalizó, fundamentalmente, en la explotación y selección directa de las plantas que crecían en la zona de los monzones y poseían un crecimiento anual (Fuller, 2011a). Estas poblaciones locales, proto-*indica*, fueron la base para el desarrollo del arroz *indica* actual (Fuller, 2011a; 2011b).

Por otro lado, los antecedentes genéticos señalan que el arroz *japonica* e *indica* están relacionados a diferentes accesiones silvestres (Xu et al., 2007; Rakshit et al., 2007). Es así como el arroz *japonica* es más cercano genéticamente a *O. rufipogon* y el arroz tipo *indica* a *O. nivara* (Londo et al., 2006; Kovach et al., 2007; Xu et al., 2007; Huang et al., 2012; Choi et al., 2017). La mayor cercanía genética del arroz *japonica* con *O. rufipogon* se ve reflejado, también, en la ausencia de barreras de incompatibilidad entre ellos (Oka, 1988), presencia de poblaciones intermedias y abundancia de secuencias polimórficas compartidas (Wang et al., 2018b).

En relación a su distribución geográfica, el arroz tipo *indica* está distribuido, principalmente, en zona tropicales y subtropicales, y el arroz *japonica* en zonas templadas. Esta situación permite a ambas subespecies, ser cultivadas desde la línea del Ecuador hasta 50° de latitud norte (China) y hasta los 36° de latitud sur (Chile), y en suelos ubicados a nivel del mar hasta aquellos situados a 2.700 m s.n.m., en parte de los montes Himalayas, todo lo cual representa una amplia gama de condiciones agroecológicas y sistemas de cultivo (Fuller et al., 2010b).

Cambios ocurridos en la planta durante la domesticación

De acuerdo a la evidencia arqueológica, la domesticación del arroz fue un proceso lento y prolongado que se inició con la colecta y siembra de arroces silvestres, que continuó con un proceso de pre-domesticación, domesticación y que terminó en su cultivo (Fuller et al., 2007b; 2009; 2010a; Bellwood, 2011; Purugganan y Fuller, 2011; Civán y Brown, 2017; Stevens y Fuller, 2017).

El proceso de domesticación generó cambios morfológicos, fisiológicos y genéticos que llevó a una diferenciación de las plantas domesticadas respecto a sus ancestros silvestres (Purugganan y Fuller, 2009), producto de la manipulación de la planta para el consumo y alimentación de la población (Fuller et al., 2010a; 2012b).

Los principales cambios que ocurrieron en la planta de arroz durante su proceso de domesticación fueron: reducción del desgrane (dehiscencia) de la espiguilla (panoja) y de la dormancia de la semilla, mayor sincronización en el proceso de madurez de la planta, reducción del número de macollas y altura de la planta, aumento del tamaño de la panícula, reducción del largo de las aristas, cambio en la coloración del pericarpio de la semilla y del hábito de crecimiento de la planta desde perenne a anual, y aumento del tamaño del grano y del rendimiento de la planta (Li et al., 2006b; Londo et al., 2006; Fuller, 2007; Purugganan y Fuller, 2009; Fuller et al., 2012a).

Además de estos cambios fenotípicos en la planta, se produjeron también cambios en sus hábitats originales de crecimiento y algunas prácticas culturales, tales como el abandono de las zonas pantanosas a zonas no pantanosas y el mejoramiento en el manejo del agua y de las ma-

lezas, todo lo cual contribuyó al aumento en la productividad y a los cambios en las relaciones económicas, sociales y culturales en la población (Fuller y Qin, 2010; Gross y Zhao, 2014; Yang et al., 2015; 2016; Deng et al., 2015; Silva et al., 2015).

Todos estos cambios ocurrieron lentamente, donde los primeros (semi-domesticación) fueron el aumento del tamaño del grano, la pérdida de apéndices como pelos y barbas, los que fueron seguidos (domesticación final) por la reducción del desgrane que impidió a la semilla dispersarse en forma natural (Fuller et al., 2010a). Una vez que estos cambios ocurrieron en el (los) centro(s) de domesticación, el arroz inició su proceso de diseminación a otras regiones (Fuller et al., 2007b).

El origen independiente del arroz *japonica* y del tipo *indica* causó una profunda diferenciación genética debido a la: a) ocurrencia de un ´cuello de botella` previo a la domesticación (Yang et al., 2012a) que afectó en mayor medida al arroz tipo *japonica* que al *indica*, lo que implicó una importante pérdida de diversidad genética (Gao e Innan, 2008); b) presencia de un grupo de alelos específicos en *japonica* e *indica* que tendrían su origen en diferentes poblaciones de *O. rufipogon* (Second, 1982; Oka, 1988; Sun et al., 2002; Cheng et al., 2003; Vitte et al., 2004; Garris et al., 2005; Londo et al., 2006; Kawakami et al., 2007); c) presencia de un proceso de selección y/o flujo génico ocurrido en ambas subespecies (Caicedo et al., 2007).

Se estima que la diferenciación de *japonica* e *indica* de su progenitor silvestre habría ocurrido alrededor de 86 mil a 440 mil años atrás (Ma y Bennetzen, 2004; Vitte et al., 2004; Garris et al., 2005; Zhu y Ge, 2005; Civán et al., 2015; Choi et al., 2017). Otras estimaciones señalan que el tiempo de divergencia entre *O. rufipogon* y *O. sativa* se remonta a 8 mil 200 años atrás, y entre *japonica* tropical e *indica* a 3 mil 900 años, al utilizar la tasa de sustitución nucleotídica, y a 13 mil 500 años cuando se usó el reloj molecular (Molina et al., 2011), o entre 13 mil 100 y 24 mil 100 años, cuando se consideró la primera separación de *japonica*, *indica* y *aus* (Choi et al., 2017). Toda esta información sugiere que la diferenciación entre las poblaciones de arroz ocurrió previa a la domesticación, lo que apoya la hipótesis del origen independiente de la domesticación del arroz asiático.

La diferenciación genética observada entre las subespecies *japonica* e *indica* ha sido corroborada, también, por diversos análisis filogenéticos (Londo et al., 2006; Caicedo et al., 2007); de divergencia genética (Duan et al., 2007; Caicedo et al., 2007; He et al., 2011; Yang et al., 2012a; Wang et al., 2018a); de análisis amplios del genoma (Londo et al., 2006; Huang et al., 2012; Civán et al., 2015; Choi et al., 2017; Choi y Purugganan, 2018); de estudios de cloroplastos (Duan et al., 2007; Kawakami et al., 2007); de mitocondria (Sun et al., 2002); y por diferentes marcadores bioquímicos, como isoenzimas (Second, 1982), y moleculares como RFLP (Lu et al., 2002), transposones (Cheng et al., 2003; Hu et al., 2006) y SSR (Zhou et al., 2003; Garris et al., 2005) y la presencia de algunas barreras de incompatibilidad (Yang et al., 2012b).

Por otro lado, otros estudios genéticos han determinado también altos grados de diferenciación entre estas dos subespecies, utilizando el parámetro *Fst* (cuyo valor varía entre 1 y 0, siendo 1, independiente y 0, idéntico). Es así como el valor de divergencia (*Fst*) entre *japonica* e *indica* fue de 0,37 a 0,45 (Garris et al., 2005; Zhao, 2010; Huang et al., 2012); 0,20 entre *japonica* tropical y *japonica* templado; 0,45 entre *indica* y *japonica* templado; 0,23 entre los tipos *aromatico* y *japonica* tropical; 0,39 entre *indica* y *aromatico*; y 0,26 entre *indica* y *aus* (Garris et al., 2005).

Desde el punto de vista agronómico, Oka (1988) menciona que los arroces tipo *indica* y *japonica* se pueden diferenciar, utilizando algunos criterios como la resistencia al cloruro de potasio, la sensibilidad a las bajas temperaturas, el largo de los pelos del apículo y la reacción al fenol. Además, señala que algunas características agronómicas podrían servir, también, como referencia para diferenciar estas dos subespecies (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características agronómicas que diferencian al arroz tipo *indica* y *japonica*.

Características	*indica*	*japonica*
Resistencia al frío al estado de plántula	Bajo	Alto
Resistencia a la sequía al estado de plántula	Alto	Bajo
Resistencia a la tendedura (variedades no mejoradas)	Bajo	Alto
Respuesta en el rendimiento a aplicaciones de nitrógeno (variedades no mejoradas)	Bajo	Alto
Absorción de nitrógeno al estado de plántula	Alto	Bajo
Habilidad competitiva de la planta	Alto	Bajo
Temperatura mínima para germinar	Alta	Baja
Respuesta de la temperatura al estado de germinación y velocidad de crecimiento	Alta	Baja
Longevidad de la semilla en almacenaje	Larga	Corta

Fuente**:** Oka, 1988.

Origen del arroz *japonica* e *indica*: antecedentes genéticos

El origen del arroz es un tema complejo y de gran interés por las implicancias que puede tener en diferentes aspectos científicos y aplicados. Actualmente existen varias hipótesis que tratan de conjugar la información arqueológica, morfológica y genética disponible para explicar este fenómeno. Una hipótesis plantea que la domesticación del arroz tiene un origen único y la otra sugiere un origen múltiple.

Hipótesis del origen único

La hipótesis del origen único sugiere que el arroz asiático fue domesticado una sola vez (Chang, 1976; Lu et al., 2002; Gao e Innan, 2008; Molina et al., 2011; Huang et al., 2012) desde poblaciones silvestres de *O. rufipogon*, y que una vez que fue domesticado se pudo diferenciar en las subpoblaciones o grupos genéticos conocidos hoy día (Oka y Morishima, 1982; Vaughan et al., 2008b).

La evidencia molecular que apoya al origen único señala que el control genético de algunos alelos claves en el proceso de domesticación, como el desgrane (*sh4*), color crema del pericarpio del grano (*rc*) (Kovach et al., 2007; Sweeney y McCouch, 2007), hábito de crecimiento alto y erecto (*prog1*) (Tan et al., 2008), contenido de amilosa (Wx^b) (Olsen et al., 2006) y el de la fragancia (*badh2.1*) (Kovach et al., 2009), tienen un origen único, y que estos genes fueron introgresados y fijados, posteriormente, desde *japonica* e *indica* (Li et al., 2006b; Sang y Ge, 2007a; 2007b; Sweeney et al., 2007; Tan et al., 2008; Vaughan et al., 2008a; Molina et al., 2011).

Origen independiente y múltiples centros de domesticación

El origen independiente plantea varias líneas de sustentación, entre las que se pueden señalar: a) la diversidad citoplasmática presente en arroces silvestres y cultivados (Kawakami et al., 2007); b) la diferenciación genómica entre *indica* y *japonica* previa a la domesticación, alrededor de 0,4 a 0,2 millones de años (Ma y Bennetzen, 2004; Vitte et al., 2004; Zhu y Ge, 2005); y c) la presencia de

haplotipos tipo-*indica* asociados con arroz silvestre del sur y sudeste de Asia y haplotipos tipo-*japonica* asociados con accesiones silvestres de China (Londo et al., 2006) y con variedades *indica* y *japonica* (Olsen y Purugganan, 2002; Saitoh et al., 2004).

Esta hipótesis plantea también, que las introgresiones y la selección han jugado un rol importante en la fijación de un grupo de alelos críticos para la domesticación en los cultivares contemporáneos (Kovach et al., 2007; He et al., 2011; Choi et al., 2017). En este aspecto, se señala que la mayoría de las introgresiones fueron unidireccionales y ocurrieron, principalmente, desde el arroz *japonica* al tipo *indica* (Yang et al., 2012a; Choi et al., 2017). Estudios realizados recientemente, han detectado la presencia de un significativo flujo genético desde los tipos *aus* y *japonica* hacia los tipo *indica* (10 % - 28 %), de *japonica* a *aus* (8 % - 41 %) y de *indica* a *aus* (5 % - 33 %). Como aus recibió flujo génico de *japonica* e *indica*, es posible que haya recibido también, en forma indirecta, desde *japonica* hacia *indica* y desde allí a *aus*. Esta información permite señalar que hubo transferencia de alelos de domesticación desde el tipo *japonica*, a las poblaciones proto-*indica* y proto-*aus* (Choi et al., 2017). En este sentido, se plantea que los genes relacionados con la domesticación como *PROG1*, *Moc1*, *Rc*, *BADH2*, y *GS3* habrían sido transferidos desde *japonica* a *indica* (Sweeney et al., 2007; Kovach et al., 2007; Yang et al., 2012a).

Una investigación reciente plantea que, posiblemente, el proceso de introgresión de los genes de domesticación desde *japonica* a *indica* no es un fenómeno general, ya que algunos genes no presentaron signos de introgresión. Esta misma situación ocurre entre las subespecies, donde el arroz tipo *indica* presentó un menor nivel de introgresión que el arroz *japonica* (Civán y Brown, 2017; 2018; Choi y Purugganan, 2018). Esta última situación podría estar relacionada con la existencia de una barrera genética reproductiva parcial entre *japonica* e *indica* que estaría restringiendo el flujo libre de genes entre ambas subespecies (Harushima et al., 2002; Yang et al., 2012a).

La hipótesis del origen independiente, pero con múltiples centros de domesticación del arroz (Caicedo et al., 2007; Fuller et al., 2010b; Gross y Zhao, 2014; Huang y Han, 2016; Castillo et al., 2016; Choi et al., 2017), es apoyada por la evidencia arqueológica y botánica que ha señalado que la domesticación habría ocurrido una sola vez en *japonica* y que existirían al menos dos lugares de domesticación para el arroz *japonica* e *indica*. Esta hipótesis plantea también que, en el proceso de hibridación, los alelos de domesticación habrían sido introgresados desde poblaciones de arroz *japonica* a las subpoblaciones proto-*indica* y también a las poblaciones proto-*aus*, lo que habría llevado finalmente a la domesticación de *indica* y *aus* (Fuller y Qin, 2009; Fuller et al., 2010b; Choi y Purugganan, 2018).

Actualmente, los datos genéticos y geográficos señalan que la domesticación de los arroces *japonica*, *indica*, *aus* fue un proceso independiente (Londo et al., 2006) y multiregional (Civán y Brown, 2018). En este sentido, Civán et al. (2015) sugieren que el arroz *indica* tendría su origen en el sur de Indochina, en el valle de Brahmaputra, o India (Fuller et al., 2010b; Fuller, 2011a; Choi et al., 2017), mientras que el arroz tipo *japonica* sería originario de los alrededores del río Yangtze (Fuller et al., 2010b; Gross y Zhao, 2014; Deng et al., 2015), con sus dos adaptaciones tardías que dieron origen al arroz *japonica* tropical y *japonica* templado (Garris et al., 2005; Londo et al., 2006; Kawakami et al., 2007; Civán et al., 2015). Por otro lado, se postula que el arroz tipo *aus* provendría de una amplia región que va desde India central a Bangladesh (Londo et al., 2006; Civán et al., 2015), y que el arroz tipo *aromatico* sería un híbrido entre el tipo *japonica* y las poblaciones silvestres de la zona, probablemente, del tipo *aus* (Civán et al., 2015).

Estos resultados han llevado a plantear un modelo sobre el posible origen del arroz domesticado, que incorpora antecedentes arqueológicos y genéticos disponibles (Choi et al., 2017).

Choi et al. (2017) plantean que durante la diseminación de *O. rufipogon*/*O. nivara* a través del sur y este de Asia, ocurrida hace unos 500 mil años, las poblaciones de arroz silvestre empezaron a diferenciarse en las regiones, donde la última gran expansión de *O. rufipogon* hacia al este de Asia y *O. nivara* hacia el occidente de Asia del Sur, habría ocurrido durante la retirada de la última

glaciación 10 mil a 13 mil 500 años atrás (Fuller et al., 2010b), llegando a la máxima expansión del arroz silvestre a principios del Holoceno, entre 11 mil 500 y 8 mil años. Dentro de este contexto, es posible que haya ocurrido un cultivo incipiente de arroz silvestre por las comunidades de cazadores/colectores y cultivadores tempranos en China e India, alrededor del 6.000 a. C. (Fuller y Qin 2009; Fuller et al., 2010b). Posteriormente, el arroz *japonica* ya domesticado, se habría diseminado a India vía Asia central a través de la ruta de la seda (corredor Hexi), alrededor de 4.000 a. C. (Stevens et al., 2016), donde se cruzó con las poblaciones proto-*indica*. Este proceso habría permitido la incorporación de genes de domesticación del arroz *japonica* al arroz proto-*indica*, dando origen al arroz *indica* domesticado, alrededor de 2.000 a. C., a la intensificación de la agricultura y a la diseminación del arroz al sur y al sudeste de Asia, entre los años 1.000 y 500 a. C. (Kingwell-Banham, 2019).

Finalmente, existe consenso que los arroces *indica* y *japonica* fueron domesticados en forma independiente desde diferentes progenitores silvestres y que este proceso dio origen a un alto grado de diferenciación genética entre *japonica*, *indica* y *aus*, el que estuvo favorecido por una serie de factores como la aislación geográfica (Zhou et al., 2003; Garris et al., 2005), flujo de genes (He et al., 2011; Yang et al., 2012b), y ´cuellos de botella` (Yang et al., 2012a), donde todos estos factores habrían contribuido a generar cambios importantes en algunas características fenotípicas en la planta, las que facilitaron la domesticación de estas especies (Sang y Ge, 2007a; Hua et al., 2015; Oikawa et al., 2015; Si et al., 2016) y la posterior selección y adaptación de los diferentes tipos de arroz a las distintas condiciones ambientales (Vaughan et al., 2008b; Molina et al., 2011; Yang et al., 2012a; Huang y Han, 2016).

Origen del arroz *japonica* y su diseminación en China: evidencia arqueológica

El origen y la domesticación del arroz asiático están íntimamente relacionados con la evolución de la agricultura china. En China, la agricultura temprana (Neolítico) se ubicaba en dos regiones, en la zona norte árida y fría, dedicada principalmente al cultivo de mijo (*Setaria italica* (L.) P. Beauv.) y *Panicum miliaceum* (L.), y en la zona sur, calurosa y húmeda (región central y baja de la cuenca del valle del río Yangtze) destinada, principalmente, al cultivo de arroz (Fuller, 2007; Barton et al., 2009; Zhao, 2011; Deng et al., 2015).

Posibles centros de domesticación

El centro de domesticación del arroz *japonica* es parte de un intenso debate respecto del cual no hay un acuerdo definitivo. La hipótesis más aceptada es que el arroz *japonica* fue domesticado de poblaciones silvestres del sur de China (Fuller y Sato, 2008), donde los restos arqueológicos asociados al cultivo consideran cuatro regiones (Figura 3) como posibles candidatas (Fuller et al., 2008; 2009; 2010b; Zhao, 2011; Gross y Zhao, 2014; Deng et al., 2015; Silva et al., 2015) y donde es muy posible que varios de estos procesos hayan ocurrido en forma paralela.

Los posibles centros de domesticación son: 1) zona baja del valle del río Yangtzé, donde Tianloushan es la secuencia regional representativa del cambio hacia la domesticación del arroz (6.000 a 4.000 a. C.); 2) zona media del valle del río Yangtzé, donde se cultivó arroz, probablemente, en los tiempos de Bashidang (7.000-6.000 a. C.) (Fuller, 2011b; Fuller et al., 2008; 2009); 3) parte baja del río Huanshi y alta del río Huai con el sitio Jiahu, en el río Huai (7.000 a 6.000 a. C.), sin una clara evidencia de arroz domesticado, pero con una evidencia cercana de Baligang, en el valle del río Han (Zhang y Hung, 2013a) y Tianloushan o sitios más tardíos encontrados en la parte baja del río Yangtze (Deng et al., 2015); 4) valle del Huaihue con la presencia de arroz domesticado o posiblemente silvestre colectado (Stevens y Fuller, 2017).

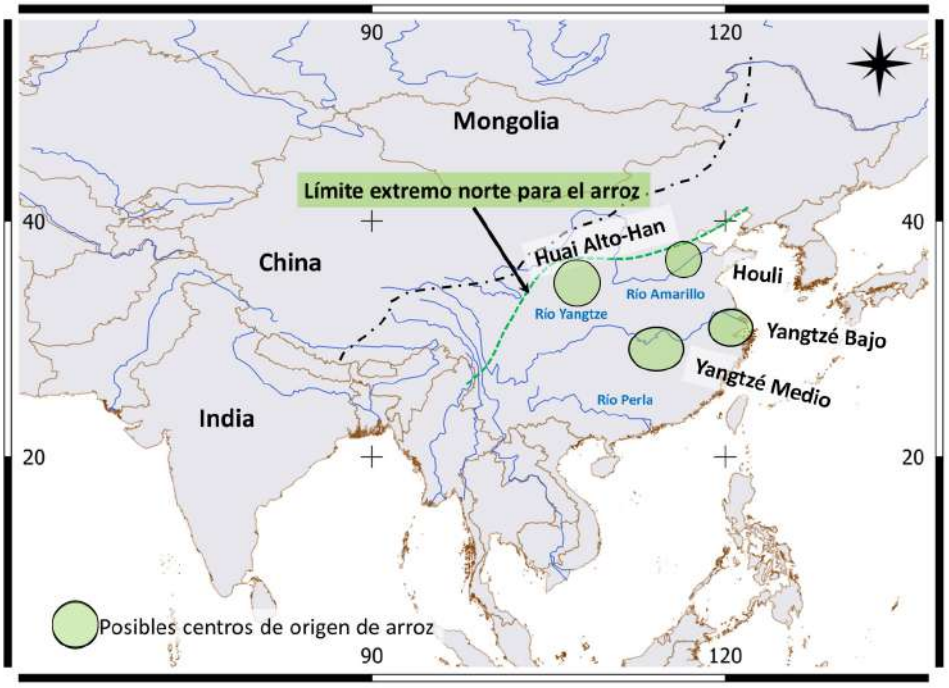


Figura 3. Posibles centros de origen del arroz tipo *japonica* (Adaptado de Zhang y Hung, 2013b; Stevens y Fuller, 2017).

Zona baja del valle del río Yangtze

La evidencia más temprana de la presencia de arroz en la zona baja del valle del río Yangtze, se encuentra entre los años 10.000 y 8.000 a. C. (Jiang y Liu, 2006; Zong et al., 2007; Gross y Zhao, 2014; Zheng et al., 2016; Zhao, 2011; Cohen, 2011; Zuo et al., 2017). Toda esta información señala la presencia de agricultura temprana, sin embargo, como los materiales encontrados no presentaron las características típicas del grano domesticado, se postula que este arroz correspondería a material silvestre recolectado (Fuller et al., 2007b; 2010b; 2011; Gross y Zhao, 2014; Castillo et al., 2016; Stevens y Fuller, 2017). Esta recolección habría sido posible gracias a la expansión del arroz silvestre hacia algunas zonas de las provincias de Henan, Jiangsu y Shandong, en el norte de China, producto del cambio climático ocurrido en aquella época y a la abundancia de agua de la zona (Nakamura, 2010).

El inicio del proceso de domesticación en arroz en esta área, en los sitios Kuahuqiao (6.000-5.400 a. C.) y Tianloushan alrededor de 4.650 a. C. (Fuller et al., 2009) estuvo asociado a la presencia de las primeras herramientas de madera y hueso, y luego de piedra, que podrían haber sido utilizadas en el acondicionamiento del suelo y de algunos utensilios utilizados en la cocción de arroz (Nakamura, 2010). Este proceso de domesticación continuó desarrollándose (5.000 a. C.) en la fase Hemudu/Majiabang (Fuller, 2007) donde se encontraron granos de mayor tamaño (2,5 a 3,0 mm), pero sin alcanzar el tamaño visto en los lugares más tardíos (Fuller et al., 2014). A finales del período Majiabang (Caoxieshan *ca*. 4.000-3.800 a. C.) se detectó una cantidad importante de arroz domesticado (no dehiscente), presencia de malezas típicas de suelos cultivados (Fuller et al., 2010b; 2014), manejo de suelo y, posiblemente, del agua en pequeños campos destinados a aumentar la producción (Weisskopf et al., 2015). Este cambio en la morfología de la espiguilla de la planta, permitió una reducción en el desgrane de la planta, mayor control en la cosecha y aumento en el rendimiento de la planta (Fuller, 2007).

Una vez que el arroz fue domesticado (4.000 a. C.), se empezó a utilizar un manejo del agua a mayor escala (Fuller y Qin, 2009; Fuller y Weisskopf, 2011; Fuller et al., 2011). Es así como en siembras ocurridas alrededor de 4.200 a 3.800 a. C., se encontraron pequeños campos conectados con canales artificiales y reservorios profundos que sugieren un manejo y control del agua destinado a mejorar la producción (Fuller y Qin, 2009; Nasu et al., 2011). Otra característica observada fue la separación de los campos sembrados con arroz domesticado de aquellos que poseían arroz silvestre, lo que favoreció, posiblemente, el flujo genético y la fijación de los alelos involucrados en la domesticación, tales como tamaño del grano y dehiscencia de la espiguilla (Fuller y Qin, 2009).

En las fases posteriores (Songze, 3.500 a. C. y Liangzhu, 3.300 a 2.200 a. C.) se empezó a observar, con mayor claridad, la intensificación del cultivo, lo que se vio reflejado en: a) el uso de nuevos sistemas de siembra (similares a terrazas); b) aumento de la superficie sembrada; c) uso de animales (búfalos) para cultivar el suelo y de herramientas de piedra para realizar la cosecha tales como cuchillos y echonas; d) una mayor emisión de metano del cultivo del arroz de riego a partir de 2.000 a. C. (Ruddiman et al., 2008), lo que estuvo asociado a su mayor distribución geográfica (Fuller et al., 2011); e) una jerarquización social y un aumento de la población (Fuller, 2007; Fuller y Qin, 2009); f) el inicio de la diseminación del cultivo desde su centro de origen a otras regiones de China, alrededor de 3.300 a 2.200 a. C., cultura Liangzhu (Fuller y Qin, 2009; Cohen, 2011).

Este proceso de domesticación tomó alrededor de 2.000 años, si consideramos que el proceso de pre-domesticación se inició alrededor del 6.000 a. C. con presencia de un arroz con bajo porcentaje de domesticación en Kuahuqiao (Kuahuqiao-Hemudu) o Hemudu (Fuller y Qin, 2009; Fuller et al., 2009; 2014) hasta su domesticación final en la fase Majaibang y Songze, alrededor del 4.000 a. C. (Fuller, 2007; Fuller et al., 2007b; Fuller y Qin, 2009).

Valle del río Huaihe

Aparentemente, en la zona norte de la provincia de Anhui, se estaba llevando a cabo un proceso paralelo de cultivo y domesticación del arroz entre el 5.300 y 5.500 a. C., lo que ha quedado fundamentado por la presencia de arroces en proceso de domesticación y herramientas de piedra (Stevens y Fuller, 2017).

Parte baja del río Hanshui y alta del río Huai (Cuenca Han)

En esta zona se encuentran el sitio Jiahu 1 (6.900 a 5.800 a. C.), contemporáneo a Baligang (6.500 a 6.300 a. C.), está ubicado entre los ríos Yangtzé y Amarillo, donde se han encontrado restos de cultivos tempranos de arroz e indicios del proceso de domesticación de los granos, comparables a los sitios Kuahuqiao (Fuller et al., 2007b; Deng et al., 2015) y Tianluoshan (Zhang y Hung, 2013a; 2013b). Sin embargo, es posible que el cultivo del arroz haya ocupado una parte menor de la estrategia de sobrevivencia de esta población, ya que sus alimentos provenían, principalmente, de la caza y colecta de productos silvestres. Es posible que la ubicación de este cultivo, en el límite de su distribución natural en el Holoceno, haya estimulado su domesticación en esta zona (Zhang y Hung, 2013b).

Zona media del valle del Yangtze

La evidencia arqueológica de la zona media del valle del río Yangtze sugiere una situación paralela a lo que ocurrió en la zona baja del valle del río Yangtze, con un inicio un poco más temprano como lo revelan los restos de granos de arroz encontrados en la provincia de Jiangxi (Diaoton-

ghuan y Xianrendong), aproximadamente entre 12.000 y 9.000 a. C. (Zhao, 1998; Zhao y Piperno, 2000; Wu et al., 2012), aunque es muy probable que el arroz encontrado en esa época fuese silvestre (Deng et al., 2015).

A pesar de esta situación, la información disponible hasta ahora señala que el proceso de transición hacia la agricultura del arroz se puede ubicar aproximadamente en el año 6.300 a. C. en la zona media del valle del río Yangtze (Baligang), con la presencia de arroz en estado de domesticación (Deng et al., 2015) comparable al encontrado en Tianluoshan o sitios más tardíos, ubicados en la zona del bajo Yangtze (Zhang y Hung, 2013b) que finalizó con una agricultura de plantas domesticadas en el período Qujialing (3.500 a 2.500 a. C.) y Shijiabe (2.500 a 2.300 a. C.) (Deng et al., 2015), período que coincide con un mayor aumento de la población, una sociedad más compleja y jerarquizada, y con el inicio de la diseminación del cultivo a otras regiones dentro y fuera de China desde sus centros de origen (Fuller y Qin, 2009).

Aparentemente, previo a los 4.500 a. C., el arroz cultivado en esa zona era de secano. A partir de los años 4.300 a 3.000 a. C. (período Yangshao), se empezó a realizar una agricultura mixta de mijo y arroz, donde el cultivo de arroz era de riego (Fuller y Qin, 2009; Nasu et al., 2011; Cohen, 2011).

A pesar de algunas similitudes en los procesos de domesticación de ambas regiones, la velocidad de domesticación de algunas características fenotípicas, como el desgrane de la espiguilla y tamaño del grano, fue diferente (Fuller et al., 2010a; 2016b; Stevens y Fuller, 2017). En el bajo Yangtze, la reducción del desgrane fue un proceso lento que tomó alrededor de 2 mil años, desde el 6.000 a. C. al 4.000 a. C. (Fuller et al., 2009; 2012a; 2014). En el Yangtze medio, en el sitio Baligang, la selección por este carácter empezó más temprano, lo cual repercutió también en un proceso más temprano de diseminación del cultivo en la zona (Deng et al., 2015; Fuller et al., 2016a). Esta diferencia en el proceso de domesticación se podría deber a la presencia de diferentes genes que contribuyeron al menor desgrane en las poblaciones de arroz presentes en estas dos regiones (Fuller et al., 2016b). A pesar de que la presencia de herramientas de trabajo en esa zona es escasa y sólo ocasionalmente se han encontrado herramientas de hueso y madera (5.000 a. C.), se plantea que el cultivo del arroz pudo haber estado bien establecido entre el 4.500 y 4.000 a. C. (Fuller y Qing, 2009).

En relación a la evolución del tamaño del grano también existen diferencias entre ambas regiones. Es así como los granos silvestres encontrados en el Yangtze medio (Baligang) eran más delgados que los encontrados en el bajo Yangtze, lo que sugiere que el material encontrado en Baligang estaba en un estado menos avanzado de domesticación que los del bajo Yangtze (Deng et al., 2015). Lo anterior sugiere que el tamaño del grano evolucionó más rápido que el desgrane de la espiguilla en el bajo Yangtze (Fuller et al., 2016b).

Una vez que el sistema agrícola en el valle del Yangtze estuvo desarrollado, con cultivos y animales domesticados, el cultivo del arroz se diseminó rápidamente (Zhang y Hung, 2010), dando origen a la agricultura del arroz alrededor del 3.000 a. C. (Zhang y Hung, 2010; Silva et al., 2015; Yang et al., 2018a).

Diseminación del arroz hacia el norte de China

En China, la agricultura temprana estuvo basada en dos cultivos importantes, mijo y arroz, los que presentaban diferentes hábitos de crecimiento y nichos ecológicos. Estos cultivos, una vez domesticados, establecidos y con un cierto grado de desarrollo en sus lugares de origen, empezaron a buscar nuevos lugares de colonización, lo que permitió al arroz empezar a expandirse hacia el norte y el mijo hacia el sur. Este proceso de diseminación de ambos cultivos implicó no sólo el movimiento del cultivo, sino que también la migración de las poblaciones asociadas al cultivo, lo que impactó finalmente en aspectos económicos, sociales y culturales de la sociedad, facilitando la emergencia de la cuna de la civilización China (Bellwood, 2005; Fuller, 2011b; Bradley, 2011; Rosen et al., 2017; Lipson et al., 2018; McColl et al., 2018; Cobo et al., 2019).

Se postula que la diseminación del arroz desde la región del Yangtze y/o Huai hacia el norte de China habría ocurrido entre el 6.000 y 5.000 a. C. (Fuller y Qin, 2009) o 3.000 a. C. (Lee et al., 2007), aunque se señala que el material encontrado podría corresponder a arroz silvestre o en estado de domesticación (Fuller et al., 2007b; Fuller, 2011b; Luo et al., 2016). Sin embargo, existe acuerdo en que el arroz encontrado pertenece al tipo *japonica* y que los agricultores arroceros de esta región rápidamente habrían empezado a adaptar el cultivo del arroz a las nuevas condiciones imperantes en esa zona (Barton et al., 2009), es decir, a realizar el cultivo bajo condiciones de secano (Wang et al., 2017).

La diseminación de la producción de arroz hacia el norte y del mijo hacia el sur dio origen a una zona de agricultura mixta entre el río Amarillo y la zona del valle medio del río Yangtze (Figura 4), separada por la montaña Qinling y el río Huaihe. Esta agricultura habría sido usada como el principal alimento agrícola alrededor del año 5.500 (Zhang et al., 2010) o entre el 4.000 y 3.800 a. C. (Fuller y Qin, 2009; Nasu et al., 2011; Weisskopf et al., 2015; Stevens y Fuller, 2017).

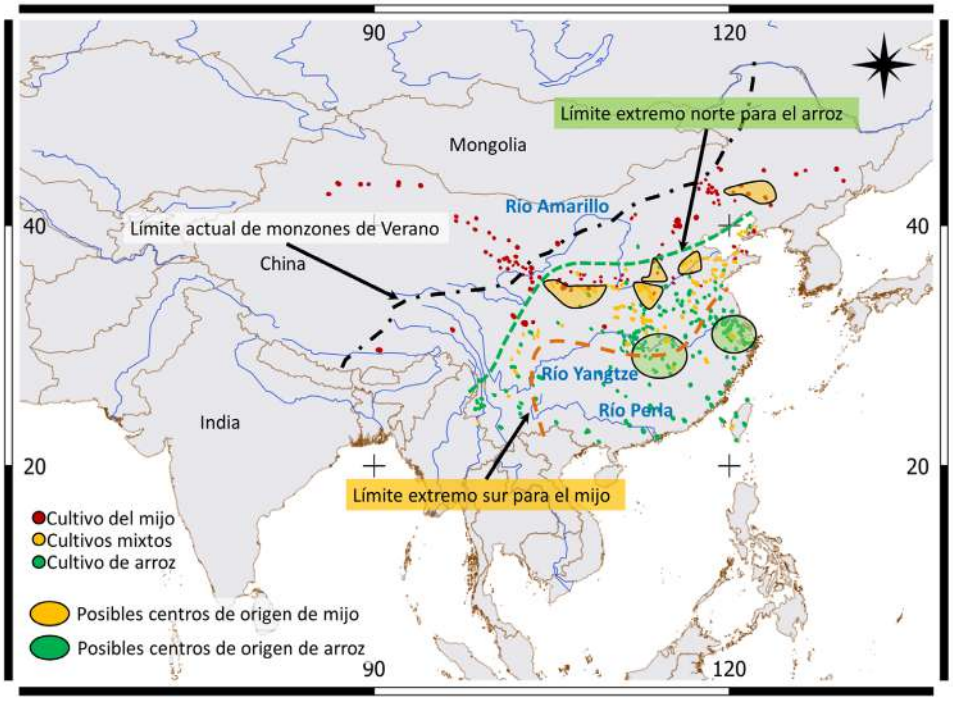


Figura 4. Inicios de la diseminación del arroz hacia el norte de China, zona de transición de arroz y mijo (Adaptado de Zhang y Hung, 2013b; Stevens y Fuller, 2017).

Aunque la subsistencia de la población estuvo basada, principalmente, en la caza-colecta-pesca, la presencia de arroz en esta zona podría corresponder a un desarrollo del cultivo temprano (Fuller, 2011b), a contactos inter-regionales con otras culturas (Cohen, 2011) y/o posiblemente a una época de transición desde cazadores-colectores hacia la producción de arroz (Zhao, 2010).

La introducción del arroz a esta zona propició la introducción y adopción de una serie de innovaciones tecnológicas, tales como la incorporación del riego, un mejor control de malezas y el uso de nuevos sistemas de cosecha, lo cual contribuyó a mejorar la productividad y disponibilidad de alimentos para una población en crecimiento. Éstos y otros antecedentes permiten postular que el arroz se diseminó como un paquete tecnológico (Weisskopf et al., 2015; Weisskopf, 2017).

En este contexto, se ha detectado la presencia de arroz en la provincia de Shandong (Fuller et al., 2009; Lanehart et al., 2011; Zhang et al., 2012a; Jin et al., 2014; 2016; Crawford et al., 2005; 2006; 2016); Shanxi (Song et al., 2019); Gansu (Li et al., 2007; Zhou et al., 2011).

El arroz cultivado en esta zona durante el Neolítico y en la Edad del Bronce fue del tipo *japonica* y se realizó en condiciones de secano (Fuller y Qin, 2009; Weisskopf et al., 2014; Wang et al., 2017). Posterior a la Edad del Bronce, la importancia del arroz se redujo, probablemente, a los cambios climáticos, lo que coincidió con la introducción del trigo de pan y la cebada en la región (Fuller et al., 2010b; d´Alpoim Guedes et al., 2015). Aunque la agricultura tradicional del norte de China, que incluye la producción de mijo, trigo y legumbres, y en menor escala el arroz, aparentemente se estableció alrededor de 1.600 y 1.300 a. C. (Lee et al., 2007).

Una de las posibles causas de la menor importancia del cultivo de arroz en la zona norte de China fue la escasa adaptación de la planta a las condiciones climáticas imperantes en la zona, debido a la presencia de bajas temperaturas (d´Alpoim Guedes et al., 2015; Song et al., 2019) y un largo fotoperíodo. Esta situación se expresó en la presencia de un alto porcentaje de espiguillas inmaduras y, posiblemente, una muy baja producción (Song et al., 2019).

Origen del arroz *japonica* templado

El arroz *japonica* representa la primera domesticación de *Oryza sativa*, ya que la forma tropical se cultivó en la parte oriental de China, entre los valles del río Yangtze y el río Amarillo, alrededor de 9.000 a 4.000 a. C., durante el período de aumento de la actividad monzónica y de las temperaturas cálidas (Huang et al., 2012; Choi et al., 2017).

La primera divergencia en el arroz *japonica* significó la separación del tipo *japonica* templado del *japonica* tropical, aproximadamente entre 5.000 y 1.500 a. C., lo que coincide con el inicio de la diseminación del arroz hacia el norte y oriente de China, a lo largo del río Amarillo (Lanehart et al., 2011), al oeste a las planicies de Chengdu y a las zonas altas del sur alrededor de 5.000 y 4.000 a. C. (d´Alpoim Guedes et al., 2013; Dal Martello et al., 2018). Sin embargo, la reducción de la temperatura, alrededor del 4.200 a. C., obligó al arroz a adaptarse a un ambiente más templado (D´Alpoim Guedes et al., 2015), lo que significó una reducción de su población efectiva en cinco a 10 veces, alrededor del 3.500 y 3.000 a. C. (Gutaker et al., 2020). Esta situación climática adversa para la planta obligó al arroz *japonica* a adquirir nuevas características, entre ellas una mayor tolerancia al frío, lo que dio origen al arroz *japonica* templado. Por esta razón, se plantea que el arroz *japonica* templado y el arroz *japonica* tropical son adaptaciones más tardías de la misma especie (Civán et al., 2015).

Una evaluación de la situación climática ocurrida en la provincia de Shandong que consideró un período de 3.000 años, señaló que en torno al 8.000 a. C. esta región pudo haber tenido una temperatura de 2.900 grados día, suficiente para el crecimiento del arroz *japonica* tropical. Sin embargo, la reducción de la temperatura a 2.500 grados día, observada en la zona durante el 5.000 a. C., permitiría sólo cultivar arroz *japonica* templado (Marcott et al., 2013; d´Alpoim Guedes y Butler, 2014; d´Alpoim Guedes et al., 2015). Esta información permitió postular que habrían ocurrido dos olas de expansión del arroz hacia el norte de China. La primera habría comenzado alrededor de los años 8.000 a. C. asociada a una temperatura adecuada para el crecimiento y desarrollo del arroz *japonica* tropical. Una segunda ola habría ocurrido alrededor del 5.000 a. C., en un escenario de reducción de la temperatura que habría permitido el desarrollo y el cultivo del arroz *japonica* templado (He et al., 2017).

Las características morfológicas y agronómicas que permiten diferenciar al arroz *japonica* tropical del *japonica* templado (Oka, 1988) se presentan el Cuadro 4.

Cuadro 4. Características diferenciales entre el arroz *japonica* tropical y *japonica* templado.

Características	*japonica* tropical	*japonica* templado
Primer largo del entrenudo (mesocótilo), crecimiento en la oscuridad	Largo	Corto
Digestión del endosperma en KOH	Fácil	Difícil
Relación largo/ancho de la espiguilla	Grande	Pequeño
Largo del tallo	Largo	Corto
Largo de la panícula	Larga	Corta
Panículas por planta	Pocas	Muchas
Diámetro del tallo	Grueso	Delgado
Hoja bandera	Larga, ancha	Corta, delgada
Período vegetativo	Largo	Corto
Largo de la segunda hoja	Larga	Corta

Fuente: Oka, 1988.

Se postula que este proceso de diseminación del arroz hacia el norte habría ocurrido a través de tres corredores norte-sur entre la zona alta, media y baja del río Amarillo y los valles del río Yangtze, alrededor de los años 5.500 a. C., 8.400 a. C. y 4.600 a. C., respectivamente, todo lo cual habría favorecido, finalmente, la formación de una agricultura mixta en la zona, la que sufrió múltiples ajustes durante su desarrollo (He et al., 2017).

En esta nueva región, la planta de arroz debió crecer y desarrollarse bajo condiciones de día largo y bajas temperaturas (Li et al., 2015), originalmente adaptada a un día corto y altas temperaturas (Fuller et al., 2016b). Para enfrentar esta situación, la evolución del arroz *japonica* comenzó con su diseminación hacia el norte de China, pero se intensificó después de los 4.000 a. C. (Fuller et al., 2016a), cuando las mutaciones comenzaron a adaptar el arroz subtropical a las condiciones templadas y lo hicieron más productivo (Wu et al., 2013). Como parte de este proceso de adaptación, se ha detectado la presencia de varios alelos en las variedades modernas de arroz *japonica* templado que han permitido una mejor adaptación del arroz a sus nuevas condiciones climáticas, como por ejemplo, el alelo *DTH-A4* presente en las variedades de arroz *japonica* templado, pero ausente en el germoplama silvestre y en el arroz que crece en el sur de China, sudeste de Asia (Wu et al., 2013), y en los arroces del norte de China que crecieron en las primeras fases (Yangshao y Longshan) del Neolítico (Song et al., 2019). Además de este gen, existen otros genes presentes en otras poblaciones de arroz y otras regiones que han contribuido a la adaptación del arroz a otras zonas de climas templados, como Corea, Japón (Fuller et al., 2011; Wu et al., 2013; Silva et al., 2015) y China (Li et al., 2015). Es así como la incorporación del gen *Hd2* que actúa en forma aditiva con el gen *Hd4* para regular la floración, ha permitido el desarrollo del cultivo del arroz en la provincia de Heilongjiang (43°25' a 53°33´ latitud norte), ubicada en la zona norte de China (Li et al., 2015). Asimismo, el gen *Ghd-7-2*, que promueve el aumento de macollas y panículas bajo condiciones de días largos (Xue et al., 2008), y los genes *DTh8*/*Ghd8*/*Hd5* que promueven la precocidad, han contribuido a la adaptación de la planta al extremo norte de Japón, en la provincia de Hokkaido (41°46´ lat N) (Wei et al., 2010; Fujino et al., 2013).

Diseminación del arroz hacia el sur de China

El cultivo del arroz después, de su domesticación, comenzó su diseminación hacia el sur (Figura 5), llegando hasta los 23° de latitud norte, alrededor del 4.900 a. C. (Gao et al., 2020). Al respecto, se ha sugerido que una de las posibles causas en la lenta diseminación del arroz hacia el sur, pudo haber estado relacionada con la ausencia de un sistema de cultivo menos intensivo en mano de obra que el usado en la cuenca del Yangtze (Fuller y Qin, 2009; Fuller et al., 2016b), con la ausencia del agua y al clima poco adecuado para el crecimiento del arroz en la zona (D´Alpoim Guedes et al., 2013; d'Alpoim Guedes y Butler, 2014). En este sentido, el desarrollo del arroz *japonica* templado, tolerante al frío (d'Alpoim Guedes et al., 2013), y de un nuevo sistema de producción de secano, menos intensivo en el uso de mano de obra, podrían haber facilitado la posibilidad de explorar nuevos ambientes, diferentes a los que ocupaba originalmente (Fuller et al., 2016a).

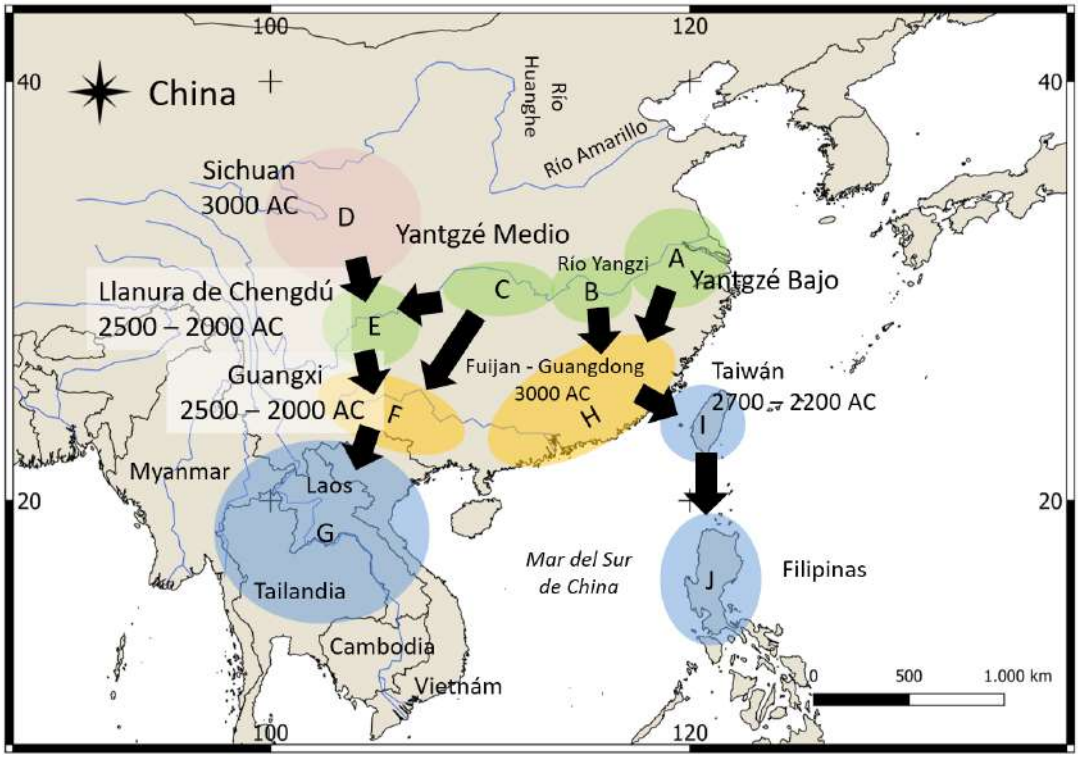


Figura 5. Propuesta de diseminación del arroz hacia el sur de China (Adaptado de Zhang y Hung, 2010)

Diseminación del arroz hacia el sudeste de China

La región al sur-este del río Yangtze comprende las provincias de Fujian, Guangxi, Guangdong y Taiwán (Gao et al., 2020). Antes de la introducción del arroz en el sur de China a finales del Neolítico, la zona de Guanxi y el occidente de Guangdong estaban habitadas por cazadores y colectores. En la costa de Fujian y en el este de Guangdong había una agricultura mixta de colecta y caza que estaba bajo la influencia del Valle Yangtze. Por el contrario, Guangxi y la parte occidental de Guangdong se habían estado desarrollando en forma independiente y sin la influencia externa. Esta situación podría explicar en parte, porqué el arroz llegó primero a la zona de la costa (Yang et al., 2018a; Gao et al., 2020).

La diseminación del arroz desde la zona de origen de domesticación, posiblemente tomó varias trayectorias. Una alternativa fue la ruta sur que pudo ocurrir entre 5.000-4.100 a. C., a través de las regiones montañosas de Wuyi y Nanling, donde el arroz habría llegado alrededor del 5.000 a. C., continuando hacia la costa para entrar al área occidental de Fujian (Gao et al., 2020), llegar posteriormente al norte de Guangdong, alrededor de los años 4.000 a. C. y, finalmente, cruzar el Estrecho de Taiwán alrededor del 4.500 a 4.000 a. C. (Yang et al., 2018a).

Otra alternativa plantea que, el cultivo del arroz fue introducido al sur de China desde el valle del río Yangtze entre 3.000 y 2.000 a. C., a través de dos rutas y procesos separados: Fujian-Guangdong y Guangxi (Zhang y Hung, 2010; 2013b; Yang et al., 2013; Hung, 2019). En este proceso, hay que considerar que los pobladores que vivían en la costa del sur de China (5.000-3.000 a. C.) eran cazadores, colectores y pescadores, y no tenían una cultura agrícola (Zhang y Hung, 2012; Hung, 2019; Yang et al., 2018a; Gao et al., 2020), por lo que la adopción del cultivo de arroz fue un proceso lento (Zhang y Hung, 2012; Hung y Carson, 2014; Hung, 2019), pero finalmente fue adoptado por esta nueva cultura (Yang et al., 2018a; Zhang y Hung, 2010).

Siguiendo hacia el sur, el arroz llegó a Taiwán entre 4.000 y 2.200 a. C. (Tsang, 2005; Zhang y Hung, 2008; Zhang y Hung, 2010; Hsieh et al., 2011; Hung y Carson, 2014; Hung, 2019). A pesar de existir una escasa evidencia arqueológica del cultivo del arroz en el este de Taiwán por razones agroclimáticas, estudios recientes han señalado la presencia de restos de arroz, posiblemente domesticado, con una antigüedad de 4.200 años, lo que constituye la primera evidencia directa de la agricultura prehistórica en la parte oriental de Taiwán (Deng et al., 2018).

Finalmente, es importante considerar que este proceso de diseminación del arroz hacia el sur de China, no sólo involucró conocimientos y las tecnologías necesarias para cultivar el arroz, sino que también una importante migración de personas y sus culturas, lo cual permitió la difusión del arroz a otras regiones (Zhang y Hung, 2010; Sagart et al., 2018; Gao et al., 2020).

En la actualidad, el arroz tipo *japonica* en China se extiende entre los 18°02´ y 53°27´ de latitud norte, lo que cubre zonas de temperaturas frías, templadas y subtropicales (Zhang et al., 2012b) en otras regiones del mundo. Al respecto, estudios realizados en el germoplasma chino señalan que el arroz *japonica* posee una amplia diversidad genética que puede ser utilizada en diferentes programas de mejoramiento genético de arroz (Zhang et al., 2012a; Wang et al., 2014b).

Diseminación del arroz al sudoeste de China

El sudoeste de China es una zona ecológicamente diversa que contiene varios ecosistemas que incluyen las colinas del norte de los Himalayas, la meseta de Yunnan-Guizhou, las Tres Gargantas (Three Gorges) y las planicies bajas de la cuenca de Sichuan (Zhang y Hung, 2010; d'Alpoim Guedes et al., 2013).

La era Neolítica en el sudoeste de China (4.000 a. C.), estuvo fuertemente influenciada por el noroeste de China, principalmente por la cultura Majiayao, radicada originalmente en Sichuan. En este sentido, se plantea que el cultivo del arroz se habría diseminado desde el valle del río Yangtze a la cuenca de Sichuan durante el período Baodun (2.700 a. C.), antes de diseminarse a la meseta Yunnan-Guizhou y a la región de Guangxi (d´Alpoim Guedes, 2011; d´Alpoim Guedes et al., 2013; Chen et al., 2015; Li et al., 2016; Gao et al., 2020), debido a la fuerte conexión entre los habitantes de la provincia de Sichuan (Chengdu), y los de la parte media del Yangtze (d'Alpoim Guedes et al., 2013). Por ello, es posible que el arroz se haya diseminado desde Sichuan a Yunnan y Guizhou alrededor del 2.500 a. C. (d'Alpoim Guedes, 2011; d'Alpoim Guedes et al., 2013), y a Guangxi (Gantuoyan) en el segundo milenio a. C. (d´Alpoim Guedes et al., 2013). La evidencia de restos de arroz encontrados en la provincia de Yunnan sugiere que el arroz fue cultivado entre 2.800 y 2.600 a. C. (Li et al., 2016; Dal Martello et al., 2018) y llegó a Yunnan como

un paquete tecnológico, donde tuvo que adaptarse a las nuevas condiciones agroecológicas de la zona (Dal Martello et al., 2018).

Basado en el tamaño de los restos de granos de arroz encontrados en la provincia de Sichuan (Haidai y Chengdu), alrededor del 5.000 a. C., es posible que el arroz sea del tipo *japonica* templado ya que presentaron un menor tamaño a los encontrados en la zona baja del Valle del río Yangtze, podría corresponder al arroz tipo *japonica* tropical (He et al., 2017).

Por otro lado, se plantea que la agricultura prehistórica de la meseta Yunnan-Guizhou se podrá dividir en tres etapas: la primera basada en el cultivo del arroz (4.800-3.900 a. C.), la segunda basada en una agricultura mixta arroz-mijo (3.900-3.400 a. C.), y la tercera con una agricultura mixta de arroz, mijo y trigo entre el 3.400 y 2.300 a. C (d´Alpoim Guedes y Butler, 2014).

Origen del arroz *indica* y su diseminación en India: evidencia arqueológica

A principios del Holoceno, los habitantes de India eran principalmente cazadores y colectores. Sin embargo, durante el Neolítico la estrategia de sobrevivencia de colecta de alimentos silvestres se vio enfrentada a un mayor aumento de la producción, del comercio, de la población y de la complejidad de la sociedad (Cooke y Fuller, 2015; Bates et al., 2016). En este sentido, entre el 4.000 y 1.500 a. C., las primeras actividades agrícolas se sustentaron en el cultivo de algunas especies nativas domesticadas (Fuller y Murphy, 2014; Murphy y Fuller, 2016), lo que fue complementado con la introducción de cultivos provenientes de otros centros de origen, como el Medio Oriente, China y África (Boivin et al., 2006; Fuller y Murphy, 2014; Kingwell-Banham et al., 2015). Esta situación dio origen a una agricultura más diversificada que terminó por establecerse alrededor del 2.000 a. C. (Fuller y Murphy, 2014; Murphy y Fuller, 2016).

En el Neolítico, la producción agrícola estuvo distribuida en cuatro macro-regiones: noroeste, que incluía al Valle del Indo, las planicies del Ganges, el sector oriente de India, y la sabana (Kingwell-Banham et al., 2015). Dentro de este contexto se podían distinguir tres grupos de pobladores: cazadores y recolectores, agricultores nómadas y agricultores sedentarios (Randhawa, 1962). A su vez, los agricultores sedentarios se podían subdividir en tres subgrupos: agricultores de zonas regadas, ubicados en el norte de las planicies del Ganges y en la zona de la costa de la península; los agricultores de secano que se dedicaban al cultivo del sorgo y mijo, ubicados en la región de la península y Gujarat; y los agricultores de trigo establecidos en las planicies centrales del noroccidente de India y Pakistán. Estos grupos tenían una estrategia económica flexible e intercambiable que les permitía interactuar entre ellos, cultural y económicamente (Randhawa, 1962).

Región noroeste y valle del Indo

La población de la civilización hindú se extendió en lo que es hoy Pakistán y el noroccidente de la India, es decir, entre la desembocadura del Indo y Punjab, y en la zona entre el Kanuma-Ganges, alrededor del 3.000 a 1.500 a. C. Esta civilización se caracterizó por ser una sociedad compleja, con asentamientos urbanos ubicados en zonas que presentaban altas variaciones geográficas, climáticas, culturales (Petrie et al., 2017; Petrie y Bates, 2017) y que poseían una estrategia alimenticia basada en animales y una amplia diversidad de cultivos (Kingwell-Banham et al., 2015; Murphy y Fuller, 2016; Petrie et al., 2016), entre los cuales estaban especies invernales como trigo, cebada, lentejas, garbanzo, y algunas frutas y cultivos de verano como arroz y diferentes especies de mijo, sorgo, *Vigna* spp., mostaza, sésamo, algodón, zapallo, vides y palma. Antes del 2.600-1.900 a. C., se solía sembrar los cultivos en forma individual o en forma múltiple, como una manera de adaptarse a las condiciones climáticas imperantes en la zona (Petrie et al., 2017; Petrie y Bates, 2017), con excepción del arroz que se cultivaba sólo (Petrie y Bates, 2017).

Planicies del Ganges

La zona del valle del Ganges fue un lugar importante en el origen de la agricultura (Singh, 2014). Esta zona regada por ríos y monzones estaba ubicada en la zona de distribución del arroz silvestre (Fuller y Murphy, 2014) y tuvo que soportar el desarrollo de densas poblaciones, primero de cazadores-colectores y pescadores (Murphy y Fuller, 2016) y, posteriormente, de aldeas sedentarias (2.000 a. C.) que desarrollaron una agricultura basada en arroz y otros cultivos introducidos como trigo, cebada y lentejas, y diferentes tipos de animales (Fuller y Murphy, 2014).

Domesticación del arroz tipo *indica*

El proceso de domesticación del arroz tipo *indica* es un tema de amplio debate, donde la hipótesis proto-*indica* es la más aceptada (Fuller et al., 2010b; Fuller, 2011a; Choi et al., 2017). Esta hipótesis plantea, en primer lugar, una explotación inicial de los tipos silvestres proto-*indica* (Fuller, 2011a; 2011b; Murphy y Fuller, 2016), dentro de un sistema de agricultura nómada (Kingwell-Banham y Fuller, 2012). Dentro de este contexto, se señala que la presencia temprana del cultivo del arroz (3.000 a 2.000 a. C.) en varios lugares de la India donde crece el arroz silvestre (Saraswat y Pokharia, 2003), como en el valle de Swat, norte de Pakistán, Cachemira y noroeste de India (Fuller y Qin, 2009; Fuller, 2006; Constantini, 2008) alrededor del 2.000-1.900 a. C.; que coincide con el término de la civilización Harappan (Figura 6).

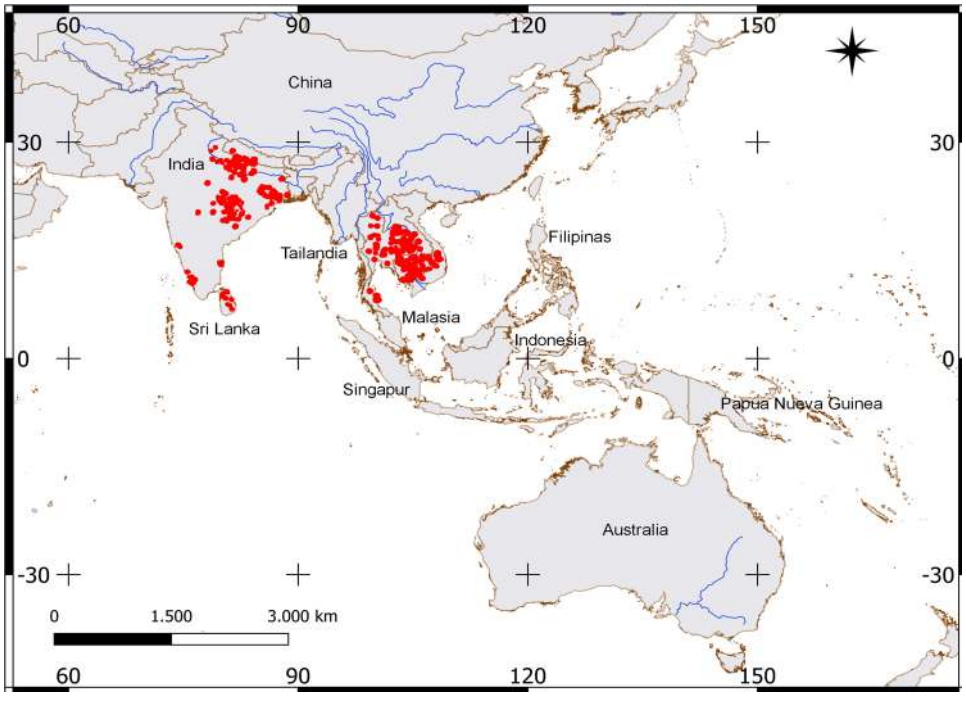


Figura 6. Distribución del progenitor silvestre *O. nivara* (proto-*indica*) (Adaptado de Vincent et al., 2013).

En segundo lugar, esta hipótesis plantea la introducción del arroz *japonica* domesticado desde China a India, en la zona alta del Ganges o en las cercanías del norte de Pakistán (Fuller y Qin, 2009; Stevens et al., 2016). La presencia del arroz *japonica* domesticado en esta zona puede ser producto de los contactos comerciales o inmigraciones de poblaciones desde China a la región Pakistán/Cachemira (Figura 7) (Fuller et al., 2010b; Fuller, 2011a; Fuller y Murphy, 2014; Bates et al., 2017). Los resultados genéticos provenientes de semillas de poblaciones arqueológicas de arroz

colectados en India, confirmaron la presencia de los genotipos *indica* y *japonica* (Castillo et al., 2016) y la hipótesis de la coexistencia del arroz *indica* y *japonica* en tiempos históricos en la India (Fuller et al., 2010b).

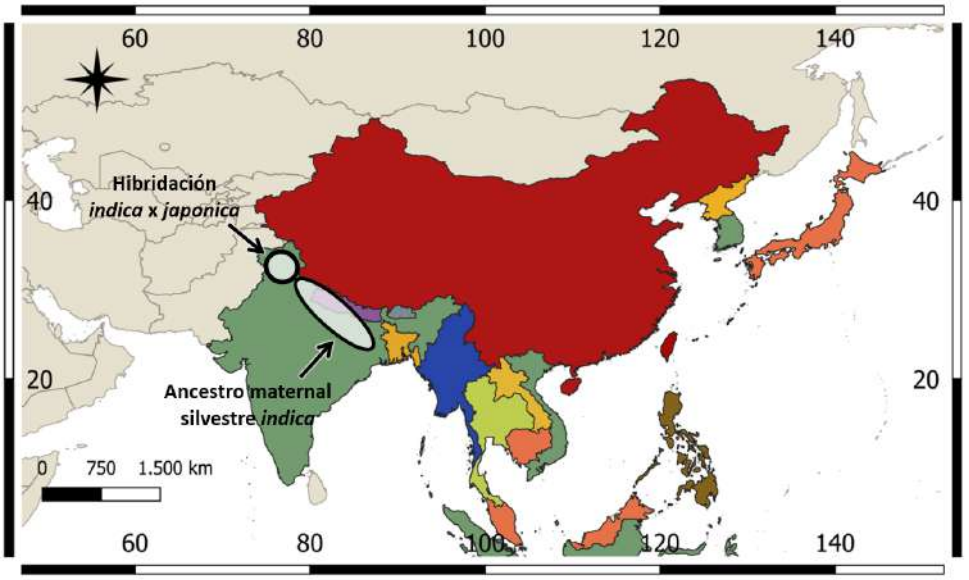


Figura 7. Posible lugar de llegada del arroz *japonica* a India (Adaptado de Fuller, 2011a; Chen et al., 2020)

Recientemente, esta hipótesis ha sido puesta en duda en base a los siguientes elementos: a) las poblaciones proto-*indica* no se encuentran en parte central de India, lugar de origen propuesto del arroz tipo *indica*, sino se han detectado poblaciones silvestres en Tailandia y el valle de Brahmaputra, como fuentes del acervo genético del arroz tipo *indica*; b) el criterio de la diferenciación del arroz *japonica* de *indica*, basado en el tamaño del grano no es preciso; y c) la dificultad de los análisis arqueológicos de diferenciar las poblaciones de arroz *indica, aus* y *aromaticas* (Civán et al., 2015; Civán y Brown, 2018; Civán et al., 2019). Por ello se plantea, que la domesticación del arroz fue un proceso multiregional que produjo en forma separada a los tipos de arroz *indica*, *japonica* y *aus* (Civán et al., 2015).

En relación a la ruta de introducción del arroz *japonica* desde China a India, se plantean varias hipótesis, entre las cuales se pueden mencionar: 1) una ruta del norte que comprendió Asia Central (Kazajistán, Kirguistán, Tayikistán, Turkmenistán y Uzbekistán) y las regiones adyacentes, Afganistán y norte de Pakistán, noroccidente de India, Mongolia y Xinjiang en el noroccidente de China (Fuller y Qin, 2009; Boivin et al., 2012; Stevens et al., 2016; Silva et al., 2018); 2) una ruta sur que plantea la llegada del arroz al noreste de la India desde el sur de China (Kovach et al., 2007; Vaughan et al., 2008b; Ikehashi, 2014), Myanmar y Tailandia (Londo et al., 2006); 3) una vía a través de Indochina y el valle de Brahmaputra (Civán et al., 2015); y 4) una ruta mixta que combina la ruta sur y la de un corredor interior seguido, estrechamente, por la vía sur a través de Assam, Bangladesh y Myanmar (Silva et al., 2018).

En tercer lugar, una vez que el arroz *japonica* domesticado se estableció en un área (Bates et al., 2017), se cruzó con los genotipos locales proto-*indica* (*O. nivara* local). Como este cruzamiento directo producía una descendencia de bajo rendimiento, debido a problemas de incompatibilidad genética, debió ocurrir un proceso de retrocruzas hacia la madre *indica* (Fuller et al., 2010b; Fuller, 2011a; 2011b; Castillo et al., 2016), seguido por una selección de los genotipos más adaptados y productivos por parte de los agricultores (Sweeney y McCouch, 2007; Fuller et al., 2010b). Este

proceso de selección habría permitido un mejoramiento de la productividad de las poblaciones híbridas producidas, como también una profunda diferenciación genética entre el arroz tipo *indica* y *japonica* (Ma y Bennetzen, 2004; Vitte et al., 2004; Choi y Purugganan, 2018). Por otra parte, como los genotipos proto-*indica* no poseían las mutaciones claves para la domesticación, el arroz *japonica* domesticado fue clave en la transferencia de estas características y en el logro final de la domesticación del arroz tipo *indica* (Fuller y Qin, 2009; Fuller, 2011a; Huang et al., 2012; Gross y Zhao, 2014; Castillo et al., 2016; Choi et al., 2017).

La primera evidencia de la presencia y uso de arroz en el valle del Ganges proviene desde Uttar Pradesh (sitio Lahuradewa) fechado alrededor del 6.400 a. C. (Figura 8). El análisis de los restos arqueológicos de arroz encontrados en este lugar, han sido clasificados como silvestres, intermedios (weedy) y/o domesticados. La denominación de domesticado se basó en el mayor tamaño del grano y en la facilidad y forma de quebrar el raquis, comparadas con el material silvestre (Tiwari et al., 2008). Sin embargo, el análisis más detallado de estos granos señaló que podrían ser producto de la cosecha de un cultivo temprano de arroz silvestre (Fuller et al., 2007a; 2010; Fuller, 2011a; Kingwell-Banham et al., 2015). Otros investigadores que apoyan este hallazgo han informado de la presencia de granos domesticados y restos de paja de arroz en esta región, en el Neolítico (Thakur et al., 2018).

A pesar de esta controversia, investigaciones recientes señalan la presencia de un lento proceso de domesticación del arroz tipo *indica*, que cubriría un lapso de 4 mil años, que abarca desde la primera evidencia de la explotación del arroz al estado silvestre (6.400 a. C.) hasta su siembra como arroz domesticado en Mahagara, alrededor de 1.800-1.600 a. C. (Fuller et al., 2010b; 2014; Fuller, 2011a; Kingwell-Banham y Fuller, 2012; Fuller et al., 2016a) o alrededor de 2.500-2.000 a. C. (Petrie et al., 2016; Pokharia et al., 2016; Petrie y Bates, 2017; Bates et al., 2017).

En relación al aumento del tamaño del grano del arroz tipo *indica*, se señala que habría empezado alrededor del 2.000 a. C. Aparentemente, este aumento del tamaño del grano ocurrió posterior a su domesticación, ya que los arroces encontrados previamente en Mahagara (1.800-1.600 a. C.) poseían un grano pequeño, similar al tipo silvestre encontrado en Lahuradewa (6.400 a. C.), y más pequeños a los granos domesticados de la Edad del Hierro o en nuestra era (Fuller et al., 2010b). Por otro lado, la velocidad del aumento del tamaño del grano *indica* fue más rápido en la India que en la región del bajo Yangtze, posiblemente debido a la mayor intensidad de selección y uso de tecnología, como riego y preparación del suelo (Fuller y Qin, 2009).

El cultivo de arroz domesticado incentivó el uso de nuevas prácticas de cultivo como la preparación del suelo, siembra, cosecha y almacenaje del grano en algunos lugares (Fuller, 2006; Fuller, 2011b; Kingwell-Banham et al., 2015; Murphy y Fuller, 2016), lo que finalmente significó un aumento en su productividad, el reemplazo de las poblaciones nativas del cultivo y una mayor disponibilidad de alimentos (Fuller y Qin, 2009; Silva et al., 2015; 2018; Murphy y Fuller, 2016). Esta nueva situación favoreció un mayor nivel de sedentarismo y el desarrollo de una sociedad más compleja que permitió pasar a un período superior de desarrollo, como fue el de la Edad del Hierro, a mediados del primer milenio a. C. (Fuller y Qin, 2009; Fuller y Murphy, 2014; Kingwell-Banham et al., 2015), y la introducción de nuevos cultivos desde el occidente que diversificó la producción (Fuller y Murphy, 2014).

Los primeros cultivos de arroz en el Ganges fueron de secano y dependieron de la lluvia de los monzones (Fuller y Qin, 2009) y de las inundaciones estacionales hasta el 2.000 a. C. (Fuller et al., 2011), ya que los primeros cultivos del arroz regado se empezaron a practicar, probablemente, en la Era del Hierro, en la parte norte y oriente de India, lo que pudo influir positivamente en su diseminación hacia el sur del subcontinente (Fuller y Qin, 2009). En algunos lugares, como el norte de la India, la llegada del riego pudo haber tomado al menos 500 a 1.000 años más, después de la llegada del arroz domesticado. Por lo cual, el cultivo de arroz en la India empezó a contribuir significativamente a las emisiones de metano, alrededor de 1.000 a. C., posterior al arroz regado de China (Fuller et al., 2011).

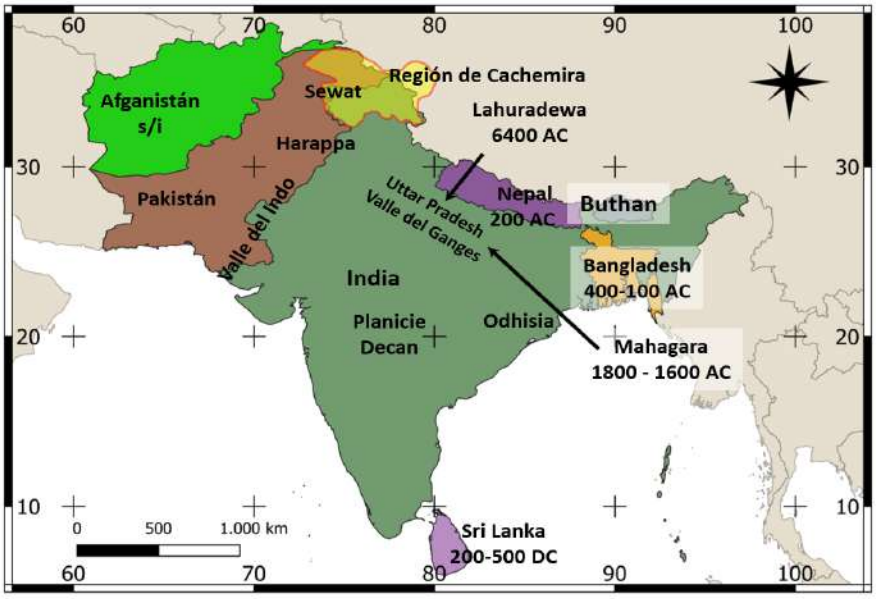


Figura 8. Diseminación del arroz tipo *indica* en India.

Sector oriente de India: Odisha (ex Orissa)

La parte oriental de India ha sido descrita como un posible centro temprano de domesticación de plantas en el subcontinente indio (Harvey et al., 2006; Misra, 2009; Fuller y Murphy, 2014). Esta región posee poblaciones de arroz silvestre (Fuller y Murphy, 2014), siendo representante de la transición entre el Mesolítico y Neolítico (Harvey et al., 2006), donde la estrategia de subsistencia de la población se basó, principalmente, en el consumo de arroz, leguminosas de grano y animales silvestres y domesticados (Kingwell-Banham et al., 2015).

En esta zona se han descrito dos tipos de asentamientos: uno ubicado en las partes altas con una agricultura de secano nómada de cazadores, recolectores y redes comerciales con grupos de otras zonas (Kingwell-Banham et al., 2018), y otra ubicado en partes bajas y planas de la costa con posibilidades de cultivos de riego (Harvey et al., 2006).

Zona alta de Odisha

La región de Jeypore de Odhisa, considerada como el centro de origen del arroz tipo *aus*, estaba habitada por varias tribus (Bondo, Langia Soura y Gabada) que habitaron en tres tipos de ambientes altitudinales, y que incluían desde cazadores, colectores y cultivadores móviles, hasta grupos más avanzados (Misra, 2009). En esta zona, el arroz era el cultivo principal y era cultivado bajo condiciones de secano, sembrado en varios sistemas de siembra: ´terrazas`; siembras ´nómadas` que implicaba una limpieza y quema de arbustos o árboles del bosque, siembra del cultivo por un período, para luego abandonar el lugar e iniciar este proceso en otro lugar; el sistema ´myda` que consistía en sembrar dos variedades juntas en el mismo campo; y el sistema de ´siembras mixtas` donde se cultivaban varias especies juntas (Misra, 2009).

Región de la costa oriental de Odisha

Durante el Neolítico, los primeros agricultores de la parte oriental de la India tuvieron su origen en las planicies de la costa (sitios Khameswaripali, Golbai Sasa, Gopalpur y Suabarei), entre el 4.000 y

3.000 a. C. (Kingwell-Banham et al., 2018). La economía de subsistencia de estas comunidades se basaba en la pesca, caza y agricultura, con cultivo de arroz y leguminosas de grano (Harvey et al., 2006; Kingwell-Banham et al., 2015; 2018; Naik et al., 2019).

Diseminación del arroz hacia el sur de la India

La diseminación del arroz hacia el sur de la India, en la Edad del Hierro, contribuyó a un gran cambio cultural, culinario, social y agrícola de la zona. Sin embargo, el proceso inicial de expansión del arroz hacia el sur de la India se vio limitado por factores climáticos, particularmente por la disponibilidad de agua (Kingwell-Banham, 2019), el que fue adquiriendo cada vez mayor importancia a partir de la Edad del Hierro (1.000-500 a. C.) hasta alcanzar su mayor expresión de dependencia, con la construcción de reservorios de agua en el periodo 500 a. C.- d. C. 500 (Kingwell-Banham, 2019). Esta relación del cultivo del arroz con el agua, también se vio reflejada por el tipo de malezas que crecían en el cultivo de arroz (Harvey et al., 2006; Shaw y Sutcliffe, 2003). Sin embargo, esta dependencia del arroz por el agua ha sido puesta en duda, por un estudio que determinó que el cultivo de arroz realizado en el sur de la India fue de secano. Esta situación explicaría, en parte, su producción limitada y su mayor valoración social (estatus) que económica entre 2.800-1.200 a. C. (Kingwell-Banham et al., 2015; Cooke y Fuller, 2015).

La diseminación del arroz hacia el sur incluyó el noroccidente de Tamil Nadu, donde el arroz llegó posiblemente a través de las redes comerciales de la época. En esta región, la agricultura era principalmente de secano y el riego sólo se utilizaba para el cultivo de arroz y algodón. La agricultura desarrollada en la zona era del tipo nómade y de escasa intensidad, ya que estaba asociada al desplazamiento de las comunidades (Kingwell-Banham y Fuller, 2012). Dentro de este contexto, es posible que el arroz haya alcanzado el extremo de la península, al occidente de la costa de Kerala, durante la Edad del Hierro o a principios de nuestra Era (Cooke y Fuller, 2015) como un producto suntuario o de valor religioso (Fuller et al., 2016a).

Origen del arroz *aus*

Se ha postulado que el arroz *aus* se habría originado de diferentes poblaciones del complejo *O. rufipogon* (Choi et al., 2017; Civán et al., 2015; Civán y Brown, 2018), incluido *O. nivara* (Liu et al., 2015). El centro de origen de esta especie estaría ubicado en la India (Londo et al., 2006; Ali et al., 2012; Civan et al., 2019), específicamente en la meseta noreste del Deccan (Misra, 2009; Ray y Ray, 2018), o en la zona Central de India o Bangladesh (Ali et al., 2012; Civán et al., 2015). Datos históricos señalan que los arroces *aus* llegaron a China, vía Vietnam, al principio del 2.000 a. C. con el nombre de arroz ´Champa` (Barker, 2011) (Figura 9). Es así como, un estudio reciente señaló que las variedades *aus* pueden tener un origen más antiguo que el arroz tipo *indica* y *japonica*, ya que comparten un mayor número de haplotipos con las poblaciones silvestres (Singh et al., 2017).

Recientemente, se ha propuesto un modelo del origen y evolución del tipo *aus* que consta de tres fases: 1) pre-origen que considera la diferenciación de su ancestro silvestre (*O. nivara* o *O. rufipogon*), ocurrido alrededor de 2 a 4 millones a. C. y que posiblemente continuó hasta la post-glaciación; 2) origen y expansión de la población ancestral durante la última post-glaciación y el Holoceno que llevó a la formación de poblaciones pre-domesticadas proto-*aus* y la adquisición de alelos específicos de *O. nivara*, *japonica* (Choi et al., 2017) y/o de *japonica* e *indica* (McNally et al., 2009) y la aparición de nuevas mutaciones, alrededor de 7.000-4.000 a. C.; y 3) período final de domesticación que continuó con la diferenciación del tipo *aus* de otros grupos de arroz, alrededor de 2.000 a. C. (Huang et al., 2012; Choi et al., 2017; Ray y Ray, 2018).

El cultivo del arroz tipo *aus* nació como una respuesta adaptativa del manejo del paisaje por una sociedad pre-agrícola, donde el arroz o sus progenitores fueron cultivados para su subsistencia junto a otros cultivos en el período Neolítico (Ray y Ray, 2018). Los primeros cultivos del arroz tipo *aus* se realizaban en zonas boscosas, donde se consideraba la tala del bosque y la quema de la ve-

getación, con la siembra del arroz por algunos años y el abandono posterior del lugar, para iniciar un nuevo ciclo. En este sistema de cultivo arcaico se practicaba el monocultivo del arroz, como también el cultivo mixto con otras especies de cultivos (Ray y Ray, 2018).

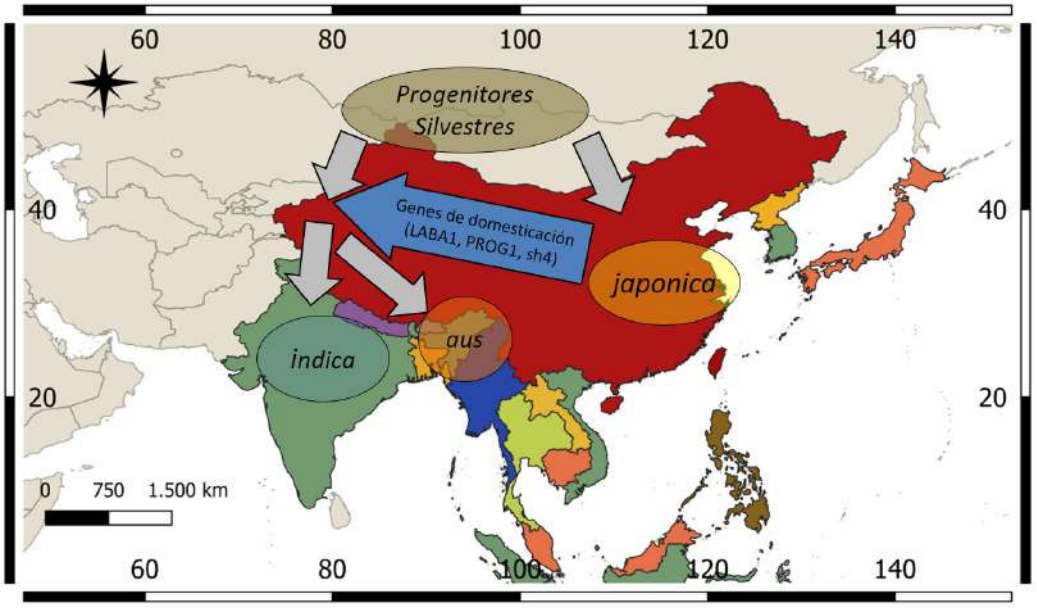


Figura 9. Zona de origen del arroz tipo *aus*, en relación a los tipos *indica* y *japonica* y posibles genes involucrados en el proceso de domesticación (Adaptado de Choi y Purugganan, 2018).

Las variedades del tipo *aus* son también conocidas como ´Aush` (Bengal) y ´Ahu` (Assam) en India, que significa precoz (Singh et al., 2017). Su nombre se usa para diferenciarse de las variedades invernales de riego ´boro` y ´ashwina` que crecen en aguas profundas y de los arroces ´rayada' que crecen en el delta del Ganges-Brahmaputra (Travis et al., 2015).

El arroz *aus* se encuentra distribuido en Bangladesh, noreste de la India (Assam, Bengal Occidental) y en las laderas occidentales de los Himalayas, y es cultivado por pequeños agricultores de muy escasos recursos económicos (Garris et al., 2003; Zhao et al., 2011).

La primera clasificación genética del arroz, basada en isoenzimas, identificó al tipo *aus* en el grupo II, típico del sur y occidente de Asia, que incluía a los ecotipos ´boro` y ´*aus*` (Glaszmann, 1987). Filogenéticamente, el arroz *aus* es cercano al arroz tipo *indica* (Garris et al., 2005; Huang et al., 2012; Singh et al., 2017); sin embargo, actualmente se postula que puede tener un origen independiente y/o reticulado de domesticación (Zhao et al., 2011; Schatz et al., 2014; Civán et al., 2015; Choi et al., 2017; Ray y Ray, 2018).

Desde el punto de vista genético, el arroz tipo *aus* puede aportar a la variabilidad genética a la especie (Misra, 2009; Schatz et al., 2014), ya que posee un grupo de genes únicos que lo diferencian de otros grupos de arroces, tales como ´snorkel` que le permite sobrevivir en aguas profundas (Hattori et al., 2009), el gen *Sub1* que le permite tolerar la inmersión en aguas menos profundas (Xu et al., 2006; Schatz et al., 2014), resistencia a enfermedades (Garris et al., 2003), tolerancia a bajos niveles de fósforo (Gamuyao et al., 2012) y a altos niveles de sequía (Bernier et al., 2009; Casartelli et al., 2018). Desde el punto de vista morfológico y agronómico, las poblaciones de arroz *aus* se caracterizan por poseer: 1) cáscara de color negra o café, 2) grano rojo, 3) presencia de barbas, 4) insensibilidad al fotoperíodo, 5) alta precocidad, 6) bajo rendimiento, y 7) reducido número de macollas (Misra, 2009).

Arroz rayada

Se plantea que el progenitor de estos arroces, que crecen sumergidos en aguas más profundas, es *O. rufipogon*, ya que posee plantas sensibles al fotoperíodo y adaptadas a crecer bajo aguas profundas (genes *SK1* y *SK2*), (Glaszmann, 1987; Catling, 1992).

La primera clasificación genética del arroz, basada en isoenzimas, identificó al arroz tipo rayada en el grupo IV, diferente al grupo *indica*, *japonica* y al arroz tipo *aus* (Glaszmann, 1987), aunque algunos estudios moleculares han detectado una relación genética con el tipo *indica* (Catling, 1992), *japonica* (Cai y Morishima, 2000; Wang et al., 2013) y polimorfismo de ADN de cloroplasto *japonica* y de mitocondria del tipo *indica* (Sun et al., 2002). Dentro del tipo rayada se reconocen tres grupos de arroces: 1) el arroz típico que crece en aguas profundas, 2) el tipo Bhadoia/ashwina, y 3) Rayada (Catling, 1992).

El arroz rayada es un ecotipo del típico arroz flotante, endémico del área de río Madhumati de Bangladesh, y se caracteriza por poseer algunas características de los arroces silvestres, tolerancia a bajas temperaturas (alrededor de 10 °C), ausencia de dormancia, sensibilidad al fotoperíodo, tolerancia a inundación debido a su facilidad de elongar sus entrenudos después de la inundación, tolerancia a sequía a causa de su largo sistema radicular, largo período vegetativo que puede durar 12 meses, y bajo rendimiento, el que puede alcanzar alrededor de 1 t ha^{-1} (Bin Rahman y Zhang, 2013; 2016).

Tradicionalmente, el arroz tipo rayada se cultiva en mezcla con las variedades tipo boro en noviembre/diciembre; donde el tipo ´boro` se cosecha en abril/mayo antes de las inundaciones, mientras que rayada continúa creciendo hasta noviembre/diciembre y permanece inundado (> a 50 cm de agua) por un período de uno a cinco meses. Florece a fines de septiembre, después que baja el nivel del agua (Bin Rahman y Zhang, 2013).

Origen del arroz *aromático*

Los arroces *aromáticos* constituyen un grupo especial dentro de la estructura genética del arroz. Su centro de origen estaría ubicado en las laderas de los Himalayas, en los Estados Uttarakhand, Uttar Pradesh, y Bihar de la India y en la región Terai de Nepal, donde se encuentra una amplia diversidad genética (Pachauri et al., 2010). Se estima que el arroz *aromático* se diseminó desde los Himalayas, hacia el noroeste de la India, Afganistán, Pakistán, Irán e Iraq, y al este a Bangladesh, Myanmar y a varios Estados de la India (Pachauri et al., 2010).

Una de las primeras clasificaciones genéticas del arroz, basadas en isoenzimas, agrupó al arroz *aromático* en el grupo V. Este grupo incluía al arroz tipo Basmati de India y Pakistán, al tipo Sadri de Irán y a las variedades de grano pequeño (Glaszmann, 1987; Khush, 1997; Kovach et al., 2009). Estudios posteriores informaron una cercanía genética del tipo *aromatico* con el tipo *japonica* (Garris et al., 2005; Kovach et al., 2009; Zhao et al., 2011; Singh et al., 2017; Wang et al., 2018b); sin embargo, el arroz *japonica* y *aromático* presentan diferencias en su origen, distribución geográfica y relaciones genéticas. Es así como, el arroz *japonica* tiene su origen en China (Fuller et al., 2016b; Huang et al., 2012; Civán et al., 2015; Civán y Brown, 2018) y los arroces *aromaticos* no están presentes en China y tienen su centro de origen en India (Civán et al., 2015; 2019). Presentan una mayor diversidad genética en los faldeos de los montes Himalayas (Glaszmann, 1987; Khush, 1997) y una mayor cercanía genética con los arroces *aus* originarios de India (Civán et al., 2015; Civán y Brown, 2016; Choi et al., 2018). Sin embargo, otros estudios informan que los arroces *aromaticos* presentan una estructura genética compleja, donde se pueden distinguir varios subgrupos, algunos cercanos al arroz tipo *indica*, otros al tipo *japonica* tropical y algunos intermedios entre el tipo *aus* y el *aromatico* (Kovach et al., 2009; Roy et al., 2015). Por ejemplo, germoplasma aromático de India es diferente en calidad al de otros grupos de arroz *aromatico* asiáticos (Jain et al., 2004).

Actualmente se plantea que el origen del arroz *aromático* presente en India es producto de una hibridación entre una población de arroz silvestre local, tipo *aus* de la India, con algunas poblaciones de arroz tipo *japonica* (Civán et al., 2015; 2019). Este hecho habría ocurrido entre 4 mil y 2 mil 400 años atrás, inmediatamente después de la llegada del arroz *japonica* a la India. Estudios genéticos recientes señalan que las accesiones actuales de arroz aromático han heredado el citoplasma y, aproximadamente, entre un 29 % y 47 % del genoma nuclear del arroz tipo *aus*, por lo cual los arroces *aromáticos* serían un producto original de la agricultura local hindú (Civán et al., 2019).

El aroma es el principal atributo que caracteriza las variedades *aromáticas* y constituye un factor determinante en el precio del producto a nivel nacional e internacional. La mayor parte del comercio del arroz aromático proviene de India, Pakistán y Tailandia (Siddiq et al., 2012).

Los arroces *aromáticos* emiten aroma durante el crecimiento y desarrollo de la planta, cosecha, almacenaje, procesamiento, cocción y consumo del arroz. El aroma en las plantas es el resultado de la presencia de numerosos compuestos volátiles y semi-volátiles que son controlados genéticamente (Gaur et al., 2016) y modificados por factores ambientales. Entre los factores ambientales se destaca el efecto de la temperatura durante la floración, llenado de grano y madurez de la planta. Es así como las variedades Basmati requieren temperaturas que oscilan entre los 25 °C y 21 °C durante el día y la noche, para retener el aroma durante el período de madurez del grano (Juliano, 1972).

Desde el punto de vista genético, el aroma en el arroz está controlado por un solo gen (*fgr*), aunque existe otra información que señala la presencia de herencia poligénica, con efecto dominante, complementario o genes duplicados. Actualmente, el locus *badh2* ha sido reconocido como el mayor determinante del aroma en el arroz (Bradbury et al., 2005; Fitzgerald et al., 2008; Kovach et al., 2009; Siddiq et al., 2012).

El origen del gen del aroma (fragancia) está en la pérdida de ocho pares de bases en el intrón siete del gen de la betaína aldehído deshidrogenasa (*BADH2*) (Bradbury et al., 2005). Así, el alelo *badh2.1* del gen *BADH2*, es el principal responsable de la fragancia o aroma en el arroz. La presencia de esta mutación en el gen *BADH2* implica el término prematuro en la lectura del gen, lo que implica la producción de una proteína truncada que anula la acción de la enzima BADH2, lo que propicia la síntesis y expresión de 2AP, en las variedades aromáticas (Gaur et al., 2016). Otros estudios han determinado la presencia de diferentes alelos responsables del aroma (Bourgis et al., 2008; Fitzgerald et al., 2008; Shi et al., 2008) en germoplasma con un origen geográfico y genético diferente (Kovach et al., 2009).

El alelo responsable del aroma tiene su origen en el arroz tipo *japonica* y su presencia en el arroz *indica*, Basmati y Jasmin se debe a un proceso de introgresión desde el material *japonica* domesticado y a una fuerte presión de selección positiva por esta característica (Kovach et al., 2009). La presencia única en el arroz tipo *japonica* quedó demostrada en un estudio realizado en genotipos silvestres (*O. rufipogon*/*O. nivara*), donde no se detectó la presencia de esta mutación en la mayoría de las poblaciones silvestres estudiadas (Kovach et al., 2009).

Desde el punto de vista comercial, el germoplasma *aromático* se puede clasificar de acuerdo a la intensidad de su aroma, en variedades con aroma suave y aquellas que producen un aroma fuerte. Sin embargo, la calidad comercial de estas variedades no está sólo determinada por su grado de aroma, sino que también por la presencia o ausencia de otros atributos como el largo y ancho del grano, elongación del grano después de la cocción, contenido de amilosa, temperatura de gelatinización, consistencia del gel y sabor (Pachauri et al., 2010).

Basadas en estas características, las variedades *aromáticas* se pueden clasificar en tres categorías: Basmati, Jasmine y en otras variedades aromáticas.

Basmati

Las principales variedades *aromáticas* comerciales son del tipo Basmati, provienen desde la India y Pakistán y poseen una denominación de origen que lo relaciona a una zona geográfica específi-

ca de la India donde se produce. El nombre Basmati significa fragante en el idioma indio (hindi) y es considerado como el ´rey` de los arroces (Siddiq et al., 2012).

Las variedades Basmati, en general, son altas, susceptibles a la tendedura y de bajo rendimiento, pero poseen una alta calidad del grano (Pachauri et al., 2010). Su grano se caracteriza por ser largo y delgado (aunque existen también variedades de grano corto), contenido intermedio de amilosa, temperatura de gelatinización baja a intermedia, consistencia mediana del gel, suavidad al paladar, sabor único y toleran un largo período de almacenamiento. Sin embargo, una de las características que se destaca a las variedades Basmati es la alta capacidad de elongación de su grano después de cocido, que en este caso alcanza casi el doble de su tamaño original (Pachauri et al., 2010).

El arroz Basmati se produce principalmente en la Planicies del Ganges-Indo y a los pies del Himalaya, siendo la India el principal productor y exportador, aunque este tipo de variedades se producen también en otros países como Pakistán, Tailandia, Bangladesh, Afganistán, China, Indonesia, Irán, Filipinas, Vietnam, Japón, Italia, Francia y U.S.A. (Pachauri et al., 2010).

Jasmín

Las variedades Jasmín son originarias de Tailandia (Pachauri et al., 2010) y se caracterizan por un contenido de amilosa, temperatura de gelatinización variable y una consistencia suave del gel (Juliano y Villareal, 1993).

El Ministerio de Agricultura de Tailandia (Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2008) divide las variedades *aromáticas* en diferentes tipos: arroz *aromático* paddy, arroz *aromático* integral, arroz *aromático* blanco y arroz *aromático* blanco glutinoso. Además, separa los arroces *aromáticos* en cuatro grupos:

Suave: incluye las variedades con un contenido de amilosa entre 13 % y 20 % con 14 % de humedad. El valor de la prueba del álcali varía entre 6 y 7, y sus granos son suaves y de textura más o menos glutinosa después de la cocción.

Suelto: incluye las variedades con un contenido de amilosa entre 20 % y 25 % con 14% de humedad. Los granos a la cocción se presentan sueltos y de textura más bien suave.

Duro: arroces no glutinosos con un contenido de amilosa de, al menos, 25 %. Los arroces a la cocción se presentan sueltos y de textura dura.

Glutinoso: el valor de la prueba de álcali está entre 6 y 7. Los granos con posterioridad a la cocción poseen las características de los arroces glutinosos.

En Tailandia, la producción de las variedades glutinosas se destina, principalmente, al consumo interno y las no glutinosas para exportación. Además de las variedades mejoradas, existe un número importante de variedades no mejoradas (landraces) que se cultivan en cuatro sistemas de producción: a) aguas profundas, b) suelos bajos de secano, c) suelos de riego, y c) suelos altos de secano.

Variedades *aromáticas* no Basmati/Jasmine

Estas variedades se caracterizan por poseer sólo algunos atributos de estas variedades, pero no todos ellos. Es así como las variedades de este tipo, presentes en India y Pakistán, poseen un tamaño de grano mediano a pequeño, diferente a las variedades Basmati/Jasmine.

Sadri

Es otro grupo de variedades *aromáticas* que se cultiva en Irán. Estas variedades se caracterizan

por un grano largo y delgado (> 7 mm). Poseen una excelente calidad culinaria, ya que posee la capacidad de elongarse similar a las Basmati, pero su contenido de aroma es menor a las Basmati (Juliano y Villareal, 1993).

Origen de otros arroces asiáticos comerciales

Desde el punto de vista comercial se pueden distinguir otros tipos de arroces como los glutinosos y pigmentados de varios colores.

Arroz glutinoso (sticky rice, sweet rice, waxy rice)

El origen de la mutación responsable del arroz glutinoso está en un gen del arroz tipo *japonica* del Sudeste Asiático, desde donde pasó al arroz tipo *indica* a través de procesos de introgresión y selección (Olsen y Purugganan, 2002), y se diseminó a otras regiones. Se ha señalado también que el probable origen geográfico del arroz semi-glutinoso *japonica* templado podría estar ubicado en la región del río Amarillo, en China. En ese caso, el verdadero arroz glutinoso habría evolucionado durante o después de la diseminación temprana del arroz *japonica* desde China hacia el Sudeste Asiático, alrededor de 5 mil a 4 mil años atrás (Fuller y Castillo, 2015).

El tipo glutinoso se produce en la región del este de Asia, parte oriental del sur de Asia y en el sudeste de Asia. Se sugiere que la tradición de la cocción al vapor de los alimentos como las preferencias culturales en el este de Asia, proveyeron las bases para la preferencia del consumo de los arroces glutinosos (Yamanaka et al., 2004; Fuller y Rowlands, 2011; Fuller y Castillo, 2015; Fuller et al., 2016a).

Los principales países y regiones productoras de arroz glutinoso están en la parte suroeste de China (provincia de Yunan y Guangxi), Corea, Japón, noreste de Myanmar, noroeste de Vietnam, parte norte de Camboya y el norte y noreste de Tailandia, República Democrática Popular de Laos, Camboya, India y Bangladesh (Calingacion et al., 2014; Figura 10). A pesar de esta situación, hoy día el arroz glutinoso se cultiva en mayor o menor medida en 37 países alrededor del mundo, donde existe un número importante de variedades tradicionales y mejoradas genéticamente. Los países que poseen el mayor número de variedades de arroz glutinoso son la RPD de Laos (2.470), Tailandia (1.289) e Indonesia (529).

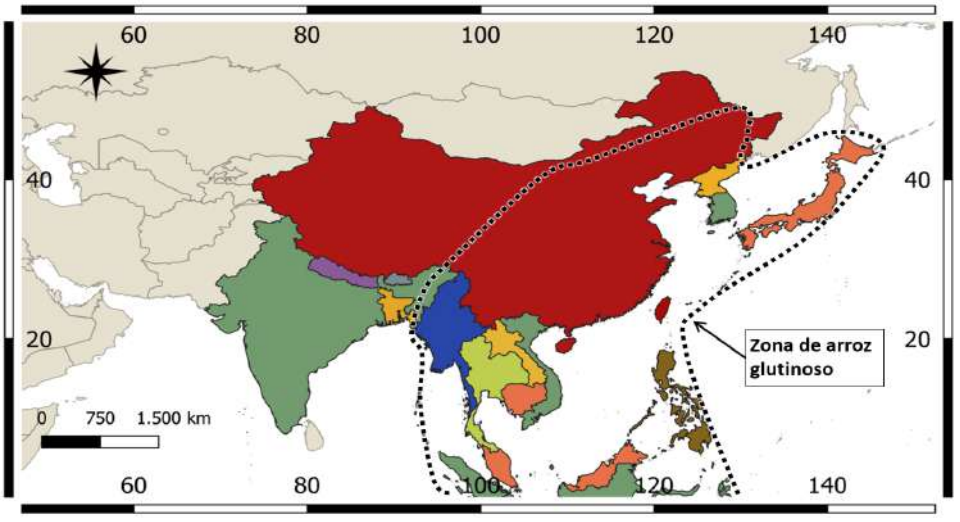


Figura 10. Distribución del arroz glutinoso (Adaptado de Fuller y Castillo, 2016).

Los arroces glutinosos presentan las siguientes características: 1) bajo contenido o ausencia de amilosa y un mayor contenido de amilopectina; 2) baja temperatura de gelatinización, baja absorción de agua durante el remojo o cocción, bajo volumen de expansión y menor tiempo de cocción; 3) bajos contenidos de humedad en granos que da un color blanco lechoso-opaco debido a la presencia de espacios de aire entre los gránulos de almidón; 4) pérdida de la forma del grano durante la cocción, ya que los gránulos de amilosa y la amilopectina se lixivian del grano, lo que afecta la viscocidad y consistencia del arroz que da origen al carácter glutinoso (Ong y Blanshard, 1995; Zhou et al., 2002; Schiller et al., 2006).

La característica glutinosa del grano está presente, tanto en el arroz tipo *indica*, como *japonica*. En los países orientales los productos provenientes del arroz glutinoso son considerados ´delicatessen` y se consumen en ocasiones especiales. En Asia, el arroz *indica* se usa para ´tamales` y ´pudding` por su suavidad, mientras que el arroz *japonica* se usa para postres dulces debido a su pegajosidad (Villareal et al., 1993). En otros países como Tailandia, Myanmar, Camboya, India, China y Vietnam, este tipo de arroz se usa también como un cereal al desayuno o cocido con hojas de banana o combinado con otros productos, tales como salsas, aderezos para ensaladas, postres, masas de *pizzas* y batidos para frituras (Juliano, 1985). Los arroces glutinosos con pericarpio negro o rojo se usan como alimentos funcionales, medicinales y cosméticos, y también como bebidas (Sarkarung et al., 2000; Lourith y Kanlayavattanakul, 2012; Banterng y Joralee, 2015). El mayor consumo de arroz glutinoso está en la RPD de Laos, donde más del 90 % de la población consume este tipo de arroz (Schiller et al., 2006; Sattaka, 2016).

Arroz pigmentado o de colores

El arroz blanco es el más consumido mundialmente. Sin embargo, en varios países se produce y consume arroz con pericarpio rojo, púrpura-negro (Oikawa et al., 2015). La gran mayoría de las variedades de arroz posee un pericarpio blanco o crema, aunque varias especies silvestres poseen un pericarpio rojo (Sweeney et al., 2006; 2007). Por ejemplo, el arroz silvestre (*O. rufipogon*), progenitor de arroz *japonica*, presenta pericarpio rojo, aristas y hojas con márgenes púrpuras debido a la acumulación de flavonoides. Pero debido a que no se han encontrado arroces de color negro en las poblaciones silvestres de *O. rufipogon*, se plantea que esta característica ha sido adquirida o incorporada durante o después del proceso de domesticación del arroz. Es así como el arroz negro ha sido usado desde muchos siglos atrás en la China ancestral, como un alimento muy valioso o como trofeo debido su rareza, por lo cual se le llamaba el ´arroz del emperador` o el ´arroz prohibido` (Sweeney et al., 2007).

El pericarpio negro y púrpura es el resultado de la acumulación de antocianos y el pericarpio rojo de proantocianidinas (Gunaratne et al., 2013; Maeda et al., 2014; Samyor et al., 2017). El genoma del arroz posee, al menos, dos genes que codifican la enzima chalcona sintasa que contribuye a la síntesis de flavonoides (Shih et al., 2008; Cheng et al., 2014). Sin embargo, para la producción de proantocianidinas es necesario la presencia de tres flavanona hidroxilasas, *F3H-1*; *F3H-2* y *F3H-3* (Park et al., 2016; Kim et al., 2018) y dos antocianidina sintasa (*ANS1* y *ANS2*) para la producción de antocianinas (Shih et al., 2008).

Como una manera de inferir las bases genéticas de la pigmentación del grano (Butardo et al., 2017; Xu et al., 2017; Yang et al., 2018b) y para determinar los patrones bioquímicos que están involucrados en estas características, se han realizado varios estudios de QTLs y de asociación (Kim et al., 2018; Oh et al., 2018; Sun et al., 2018).

El color de los granos está controlado por varios genes, *Ra*, *Rc*, y *Rd* (Zhang et al., 2006; Sweeney et al., 2007; Furukawa et al., 2007). El color blanco o crema del grano de arroz es producto de una mutación que produce la pérdida de la función del gen *Rc* y que resulta en el cambio del pericarpio de color rojo al blanco (Sweeney et al., 2006; Furukawa et al., 2007). El origen del gen mutado que confiere el pericarpio blanco fue identificado en el arroz *japonica*, desde donde fue

introgresado a las poblaciones de arroz *indica* y *aus* (Sweeney et al., 2007) y al *japonica* templado (Oikawa et al., 2015), al comienzo del proceso de la domesticación y mantenido en ellas, debido a su carácter recesivo y a la fuerte y positiva presión de selección (Sweeney et al., 2007). El gen *Rc* está estrechamente asociado con el desgrane y la dormancia del grano y fue seleccionado durante el proceso de domesticación (Sweeney et al., 2006).

El pericarpio rojo es controlado por dos loci, *Rc* que codifica el factor de transcripción (bHLH) y el gen *Rd* que codifica la enzima dihidroflavonol reductasa (DFR) (Sweeney et al., 2006; 2007; Furukawa et al., 2007). El pericarpio púrpura o arroz negro que acumula antocianos es controlado por tres alelos, *Kala1*, *Kala3* y *Kala* 4 (Maeda et al., 2014). Estos alelos pueden corresponder a otros alelos y genes descritos anteriormente (Maeda et al., 2014). Es así como *Kala1* puede corresponder a los alelos *Pp* (Wang y Shu, 2007), *Rd* (Furukawa et al., 2007), *A* (Nagao y Takahashi, 1963) y *DFR* (Furukawa et al., 2007); *Kala3* a los alelos *P* (Nagao y Takahashi, 1963), *MYB* (Saitoh et al., 2004; Gao et al., 2011), y al alelo *Kala4* le pueden corresponder los alelos *Pb* (Wang y Shu, 2007), *Pl* (Kinoshita y Maekawa, 1986), *C* (Nagao y Takahashi, 1963), y *bHLH* (Sakamoto et al., 2001) y corresponde al gen (*Os04g0557500*) que codifica el factor de transcripción bHLH, el que a su vez activa la síntesis de antocianos y da origen al color negro (Oikawa et al., 2015).

Se ha descrito también que el gen *Rc* posee tres alelos, el tipo silvestre *Rc* y dos alelos mutantes *Rc-s* y *rc*, donde *Rc-s* presenta un codón prematuro de término y *rc* le faltan 14 pares de bases de la secuencia del tipo silvestre que produce una proteína truncada que da origen al pericarpio no pigmentado (Sweeney et al., 2006; Furukawa et al., 2007). Los genotipos que poseen el alelo *rc* tienen pericarpio sin pigmentación y los que poseen *Rc-s* pueden producir varios colores en el pericarpio del grano (Sweeney et al., 2006). La mutación *Rc-s* posiblemente se originó de las variedades tipo *aus*, las que son cultivadas en una zona específica de la India y que no ha tenido una mayor diseminación a otras regiones (Sweeney et al., 2007). En el arroz africano (*O. glaberrima*) se detectó una nueva mutación (*Rc-gl*) que posee un codón de término prematuro en el gen *Rc* que resulta en un pericarpio no pigmentado que también ha tenido una distribución restringida a esta especie (Gross et al., 2010). Por otra parte, se ha detectado también un par de variantes alélicas que permiten restaurar el color rojo del pericarpio, como son *Rc-g* (Brooks et al., 2008) y Rc^{r} (Ferrari et al., 2015).

Un análisis más detallado del gen *Rc* determinó la presencia de cuatro haplotipos (*Rc*-H1, *Rc*-H2, *Rc*-H3, *Rc*-H4), los que presentaron un nivel de diversidad de 0,71, siendo *Rc*-H3 el haplotipo ancestral. Además, este haplotipo estuvo presente en todas las subpoblaciones silvestres de los grupos pro-*indica*, pro-*japonica* y pro-*aus*, y todas las accesiones silvestres presentaron pericarpio rojo (Singh et al., 2017). Por otro lado, los otros haplotipos presentaron dos rutas independientes en su origen, una desde *Rc*-H3 a *Rc*-H1 y la otra para *Rc*-H3 a *Rc*-H4 a *Rc*-H2, donde *Rc*-H1 es el haplotipo más reciente y compartido en los arroces *indica*, *japonica* y *aromáticos*, a diferencia del haplotipo *Rc*-H2 que está presente en los cultivares *aus*. Los genotipos con el haplotipo *Rc*-H3 presentaron granos con pericarpio rojo, verde y blanco, lo que sugiere la presencia de otros genes que controlan el color del pericarpio u otros polimorfismos en el gen (Singh et al., 2017). Estos resultados señalan que el color blanco del pericarpio presente en los cultivares modernos de arroz provienen de, al menos, dos eventos diferentes de domesticación en el arroz silvestre (Singh et al., 2017).

Recientemente se propuso un sistema de regulación de la coloración del grano en arroz (Sun et al., 2018). Este sistema genético *C-S-A* señala que el gen *C1* (*Os06g0205100*) codifica un factor de transcripción MYB que actúa como productor de color. El gen *S1* (*Os04g0557500*) codifica una proteína (bHLH) que actúa como coloración de tejido específico. En este modelo, *C1* interactúa con *S1* y activa la expresión del gen *A1* (*Os01g0633500*) en la síntesis de antocianos, y el gen *A1* a la enzima DFR. Como resultado de este proceso, la cáscara púrpura se forma por la catálisis del gen *A1* y la acumulación de antocianas y proantocianidinas. La pérdida de la función del gen *A1* implica que la producción de flavonoides se convierta en flavonoles y flavanones específicos (Sun et al., 2018).

En relación a la evolución de los colores, se plantea que el color blanco ha evolucionado del color púrpura debido a una mutación en el gen *C1*, aunque en el caso del arroz *japonica* existen al menos tres formas de evolución del color púrpura al color blanco. Una posibilidad es un cambio de color desde el púrpura al café por mutación en el gen *A1* y posteriormente un cambio al color blanco, debido a una mutación en el gen *C1*. Una segunda posibilidad es un cambio de púrpura a blanco por la pérdida de función del gen *C1*. La tercera posibilidad es un cambio del color púrpura al café, donde todas las mutaciones planteadas podrían haber ocurrido previo a la separación de *indica* y *japonica* (Sun et al., 2018).

Desde el punto de vista nutritivo, las variedades pigmentadas tienden a tener un mayor contenido de proteínas y balance de aminoácidos, índice glicémico y contenido de grasa, fibra y vitamina E (tocoferoles y tocotrienoles) (Gunaratne et al., 2013; Kushwaha, 2016). Los antocianinos presentes en el pericarpio y la gama orizanol del aceite de la cubierta (bran) del grano tienen propiedades antioxidantes, las cuales poseen varios componentes bioactivos que pueden presentar un efecto beneficioso para la salud humana (Maeda et al., 2014; Samyor et al., 2017; Limtrakul et al., 2019) como propiedades anticancerígena, antidiabética y antinflamatoria (Kumar y Prakash, 2020). Los arroces negros poseen dos o tres veces más cantidad de antocianos y mayores cantidades de orizanol que el arroz blanco (Cicero y Gaddi, 2001; Boonsit et al., 2010). Los arroces de colores pueden ser glutinosos y no glutinosos (Lourith y Kanlayavattanakul, 2012; Banterng y Joralee, 2015). Dado el valor agregado y la demanda de los consumidores por productos con mayor valor nutritivo, existe la oportunidad de desarrollar nuevas variedades que posean estas características (Voss-Fels et al., 2019; Kumar y Prakash, 2020).

Arroz silvestre

El arroz silvestre (*Zizania aquatica* L.), al igual que el arroz asiático (*O. sativa*) y el arroz africano (*O. glaberrima*) pertenece a la tribu *Oryzeae*, pero corresponden a diferente género. Es así como el arroz asiático y africano pertenecen al género *Oryza* y el arroz silvestre al género *Zizania* (de Wet y Oelke, 1978). El género *Zizania* incluye a cuatro especies: *Z. aquatica*, *Z. brevis*, *Z. latifolia* y *Z. interior* (de Wet y Oelke, 1978; Grombacher et al., 1997). El arroz silvestre (2*n*=2x=30) es una planta acuática que está ampliamente distribuida en la parte oriental de América del Norte, desde el sur de Ontario y Quebec en Canadá, hasta Louisiana y Florida en U.S.A. (de Wet y Oelke, 1978).

El arroz silvestre y el cultivado, posee un grano con glumas rudimentarias, pero se diferencian fundamentalmente en la estructura de su inflorescencia. El género *Oryza* posee espiguillas bisexuales a diferencia de las de *Zizania* que son unisexuales. En el arroz silvestre las espiguillas estaminales (macho) son laxas y están ubicadas en la parte inferior de la panoja a diferencia de las espiguillas pistiladas (hembras) que son erectas, están ubicadas en la parte superior de la panoja y florecen con anterioridad a las estaminales, lo que favorece la polinización cruzada. El grano es de color café oscuro, posee una longitud variable y está cubierto por la lemma y la palea (de Wet y Oelke, 1978). De acuerdo al largo del grano, éste se puede clasificar en largo (> 12 mm), medio (8-12 mm) y corto (< 8 mm) (Grombacher et al., 1997).

ORIGEN DEL ARROZ AFRICANO: evidencia genética y arqueológica

El arroz africano, *Oryza glaberrima*, posee un progenitor silvestre (Huang et al., 2015) y una historia de domesticación independiente y en lugar geográfico diferente al arroz asiático (Wang et al., 2014a; Meyer et al., 2016). Esta especie fue descrita por Steudel en el año 1858.

La distribución del área cultivada del arroz africano está ubicada principalmente en África Occidental (Figura 11) que se extiende desde el delta del río Senegal en el oeste hasta el del Lago Chad en el este, África Occidental (Semon et al., 2005), y hacia el sureste bordea las cuencas de los ríos Benue, Logone y Chari, llegando a las islas de Pemba y Zanzíbar y Tanzania (Agnoun et al., 2012).

La producción del arroz africano se realiza en cuatro sistemas de cultivo: suelos bajos y altos de secano, suelo regado y en aguas profundas. Sin embargo, las mayores áreas de cultivo se ubican en los suelos planos inundados del norte de Nigeria, al interior del delta del río Níger en Mali, partes de Sierra Leona y en las colinas del área limítrofe de Gana y Togo. Su cosecha es reducida y no se comercializa en el mercado internacional (Agnoun et al., 2012).

En África existen cinco especies silvestres de arroz: *O. barthii* (AA), *O. longistaminata*, *O. brachyantha* (BB), *O. eichingeri* (CC), y *O. punctata* (BBCC). El análisis genético de estas especies silvestres señaló que *O. barthii* y *O. longistaminata* poseen una mayor cercanía genética, una amplia y abundante distribución en la zona, crecen en sistemas acuáticos permanentes o con inundación temporal, que los hace aparecer como posibles candidatos a progenitores de *O. glaberrima*. A pesar de estas similitudes, *O. barthii* es una especie anual y de autopolinización (Nayar, 2012), a diferencia de *O. longistaminata* que es una planta rizomatosa, de hábito de crecimiento perenne, con una fuerte barrera reproductiva con *O. glaberrima*, lo que se traduce en una diferenciación en su historia temporal y genética con *O. glaberrima* (Vaughan, 1994; Vaughan et al., 2008a). Estos resultados permiten postular que *O. longistaminata*, se pudo separar más temprano de *O. glaberrima*/*O. barthii*, que del grupo *O. sativa*/*O. rufipogon*/*O. nivara* (Zhu y Ge, 2005). Por ello, se postula que el progenitor silvestre de *O. glaberrima* es *O. barthii* (Oka, 1988; Wang et al., 1992; Sarla y Swamy, 2005; Zhu y Ge, 2005; Sweeney y McCouch, 2007; Li et al., 2011; Wang et al., 2014a; Wambugu et al., 2015; Meyer et al., 2016).

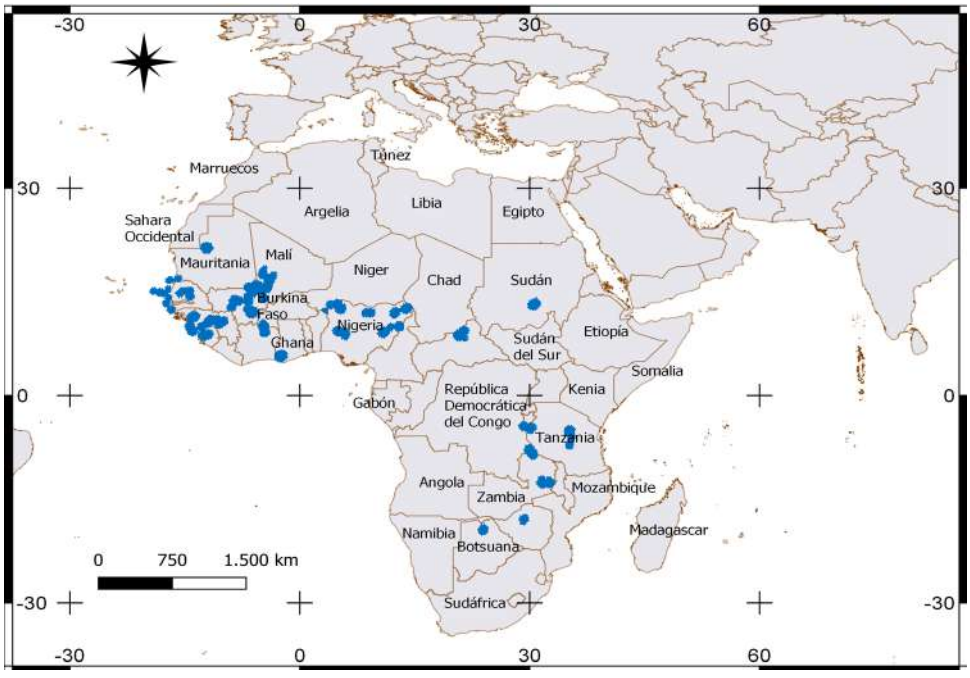


Figura 11. Distribución del progenitor silvestre (*O. barthii*) del arroz africano (Adaptado de Vincent et al., 2013).

La información existente señala que el tiempo de divergencia entre *O. sativa* y *O. glaberrima* es de aproximadamente 640 a 700 mil años atrás (Ma y Bennetzen, 2004; Zhu y Ge, 2005) o de 900 mil años (Sarla y Swamy, 2005; Huang et al., 2015). Esta situación impidió la existencia de un extenso flujo génico entre *O. sativa* y *O. glaberrima* (Ma y Bennetzen, 2004) que se vio acrecentado por la incompatibilidad genética entre ambas especies. Esta incompatibilidad genética causa esterilidad

en la progenie del cruzamiento de estas especies, lo que impide la recombinación genética causando, finalmente, la muerte de la progenie (Jones et al., 1997; Gavarito et al., 2010). A pesar de esta situación, se han podido detectar bajos niveles de introgresión (~1.0 %) desde *O. sativa* a *O. glaberrima* (Huang et al., 2015), incluso niveles mayores, dependiendo de la presión de selección y de las condiciones ambientales en que se encuentren ambas especies (Semon et al., 2005; Nuijten y van Treuren, 2007; Barry et al., 2007; Nuijten et al., 2009).

El arroz africano tuvo un proceso de domesticación independiente del arroz asiático que finalizó alrededor de 3.000 años atrás (Carney, 2002; Linares, 2002; Li et al., 2011; Wang et al., 2014a; Huang et al., 2015; Tong et al., 2016; Meyer et al., 2016, Maji et al., 2017; Cubry et al., 2018; Veltman et al., 2019), por lo que este proceso de domesticación empezó a ocurrir después del inicio de la domesticación de *O. sativa* que comenzó alrededor del 6.000 a. C. (Chang, 1976; Sarla y Swamy, 2005; Sweeney y McCouch, 2007). A pesar de la información genética disponible, los datos arqueológicos son escasos y no permiten confirmar las hipótesis planteadas (McIntosh, 1995; Klee et al., 2000; 2004; Murray, 2004; Sweeney y McCouch, 2007; Crowther et al., 2016; Orijemie, 2018).

En relación al lugar de domesticación del arroz africano se plantean dos hipótesis. La primera plantea que ocurrió en un lugar específico y la otra señala que no es posible identificar este lugar específico. Una hipótesis propone que la domesticación del arroz africano ocurrió, primero, en una región interior de la cuenca del río Níger (Carney, 2002; Sarla y Swamy, 2005; Li et al., 2011; Wang et al., 2014a; Meyer et al., 2016; Cubry et al., 2018) y luego se habría diseminado a dos centros secundarios de diversidad, uno a lo largo de la costa de Senegal y Gambia, y el otro en las alturas de Guinea (Portères, 1976). Un apoyo a esta hipótesis se encuentra en los resultados que señalan una antigua separación entre las poblaciones de la costa y las del interior, y otra más reciente entre las poblaciones del norte y del sur (Meyer et al., 2016). De acuerdo a esta hipótesis, el inicio del proceso de domesticación coincidió con el cambio de clima en la zona que implicó la transformación del bosque en sabana, alrededor de 4.000 años atrás (Clark, 1967).

La hipótesis del centro de domesticación no específico plantea que este proceso involucró miles de años y que los genotipos proto-domesticados, con algunos alelos de domesticación, se habrían diseminado a regiones con diferentes ambientes y prácticas culturales, las que habrían facilitado la aparición de mutaciones claves para domesticación, favoreciendo de esta manera la diferenciación final de los grupos genéticos identificados en una amplia zona geográfica (Cubry et al., 2018; Choi et al., 2019; Veltman et al., 2019).

La información disponible señala que el genoma de esta especie tiene un tamaño de 316 MB con un total de 33.164 (Zhang et al., 2014) a 51.000 genes (Monat et al., 2016) y un importante número de polimorfismos que pueden ser utilizados en el mejoramiento genético de la especie (Sakai et al., 2011; Wang et al., 2014a; Pariasca-Tanaka et al., 2015; Monat et al., 2016; Ndjiondjop et al., 2018a; 2018b).

Los estudios de diversidad genética realizados en el arroz africano no han permitido determinar una organización clara y definitiva de esta especie (Li et al., 2011; Nabholz et al., 2014). La ausencia de detección de una estructura genética clara en el arroz africano se podría deber a la escasa diversidad genética del material utilizado y al reducido tamaño de la muestra utilizada (Ndjiondjop et al., 2018a; 2019; Veltman et al., 2019). A pesar de esta situación, otros trabajos han identificado la presencia de una clara organización del germoplasma (Orjuela et al., 2014; Wang et al., 2014a; Meyer et al., 2016; Chen et al., 2017; Choi et al., 2019) asociada, en algunos casos, a una adaptación geográfica específica (Huang et al., 2015; Meyer et al., 2016; Ndjiondjop et al., 2017; 2018a; Veltman et al., 2019; Choi et al., 2019), a los sistemas de cultivo utilizados y a la disponibilidad de agua en las subpoblaciones estudiadas (Semon et al., 2005).

Desde el punto de vista agronómico, el arroz africano se caracteriza por tener un bajo potencial de rendimiento, buena respuesta al uso de escasos insumos (Fofana y Rauber 2000; Koide et al., 2013; Pariasca-Tanaka et al., 2014), resistencia a algunas plagas y enfermedades (Linares, 2002; Sarla y Swamy, 2005; Fatakuchi y Sié, 2009; Wambugu et al., 2013; Wang et al., 2014a), tolerancia

a la sequía (Ndjiondjop et al., 2012), salinidad (Platten et al., 2013; Meyer et al., 2016), toxicidad de fierro (Sikirou et al., 2018), y buena habilidad para competir con las malezas (Fofana y Rauber 2000; Moukoumbi et al., 2011). Desde el punto de vista de la calidad del grano, posee buen sabor (Carney, 2005), altos contenidos de amilosa y temperatura de gelatinización, lo que podía constituir una fuente natural de baja digestibilidad de almidón con importantes beneficios para la salud y con potencial para mejorar la calidad del arroz asiático (Wanbugu et al., 2013; 2018). Asociado a estas características positivas, posee algunas negativas como su alta susceptibilidad al desgrane, mayor susceptibilidad al quebrado del grano durante la molienda y un bajo rendimiento en grano e industrial (Dingkuhn et al., 1988; Sarla y Swamy, 2005).

Desde el punto de vista morfológico, el arroz africano posee un grano pequeño, con forma de pera, pericarpio rojo y cáscara negra, panículas erectas, con ramificación principal; lígulas cortas y redondeadas y hojas grandes (Linares, 2002; Agnoun et al., 2012; Wu et al., 2017). Debido al color de su pericarpio o cáscara, se le conoce como ´arroz negro` o ´arroz rojo`, aunque se han identificado también arroces con pericarpio blanco que puede ser resultado de una mutación en el gen *Rc* que controla el color del pericarpio en el arroz asiático o cruzamientos con arroces de pericarpio blanco introducidos (Gross et al., 2010).

Los estudios de diversidad genética realizados en las especies cultivadas y silvestres señalan que el arroz africano posee una estrecha diversidad genética comparado con el arroz asiático y su progenitor silvestre, *O. barthii* (Semon et al., 2005; Kwon et al., 2006; Dramé et al., 2011; Li et al., 2011; Orjuela et al., 2014; Wang et al., 2014a; Nabholz et al., 2014; Meyer et al., 2016; Ndjiondjop et al., 2017; 2019; Cubry et al., 2018), lo que se atribuye a la presencia de: a) severos cuellos de botella ocurridos durante su proceso de domesticación (Li et al., 2011; Nabholz et al., 2014; Wang et al., 2014; Meyer et al., 2016; Cubry et al., 2018; Veltman et al., 2019); b) extensos períodos de sequías que habrían causado una reducción de la población silvestre existente; c) una baja intensidad de cultivo de la especie silvestre antes de la domesticación; d) la introducción masiva del arroz asiático (Linares, 2002); y e) cruzamiento con *O. barthii* (Chang, 1976; Barry et al., 2007; Meyer et al., 2016; Cubry et al., 2018).

Los cambios ocurridos durante la domesticación del arroz africano contribuyeron a cambios en ciertos procesos fisicoquímicos, especialmente en algunas enzimas que catalizan los procesos de maduración y germinación de la semilla, síntesis de celulosa, y procesos de estrés, entre otras, así como en la morfología de la planta, tamaño del grano (Wu et al., 2017), hábito de crecimiento (Hu et al., 2018; Cubry et al., 2018; Choi et al., 2019), desgrane, desarrollo de la raíz, y tolerancia a crecer en aguas profundas (Win et al., 2017; Cubry et al., 2018, Choi et al., 2019).

Aparentemente, los primeros agricultores africanos y asiáticos seleccionaron el mismo grupo de características durante el proceso de domesticación, lo que definió un proceso de evolución independiente y convergente (Wang et al., 2014a; Cubry et al., 2018), donde la base genética y molecular de algunas de estas característica es conservada (Wang et al., 2014a; Cubry et al., 2018; Wu et al., 2018) y en otros casos es diferente en ambas especies (Wu et al., 2017; Lv et al., 2018).

La información obtenida en la cuenca del río Níger (Benín, África occidental) ha permitido identificar un posible patrón de desarrollo de una agricultura diversificada en ambientes húmedos y de secano que habría contribuido a promover la urbanización y la formación del Estado. Este trabajo pudo identificar cuatro estados de desarrollo en el sistema agrícola de esta zona. El primero (900 a. C. - d. C. 300) caracterizado por la presencia dominante de mijo y, en forma secundaria, por el sorgo y caupí. El segundo período (d. C. 300 a 900) con una mayor abundancia de arroz africano y, en menor medida, de mijo, sorgo, y caupí, y que fue capaz de sostener un mayor nivel de urbanismo en la región. Un tercer período (d. C. 1.900 a 1.400) en que se observó un aumento del mijo, reducción de arroz africano y un aumento de la población. Un cuarto período donde se observó la desaparición del arroz, disminución del mijo y la aparición de frutales, influido, posiblemente, por la presencia de un mayor comercio, explotación de nuevas áreas de secano y el comercio de esclavos (Champion y Fuller, 2018). Esta disminución de la superficie sembrada del arroz africano (Semon et al., 2005; Van Andel, 2010) ha significado la pérdida de variabilidad genética (Linares, 2002; Semon et al., 2005).

Diseminación del arroz africano fuera de África

Una vez domesticado el arroz africano desde su(s) centro(s) de origen(es), se empezó a diseminar a otros países de África (Vaughan, 1994; Ndjiondjop et al., 2017) y al Nuevo Mundo en el siglo XVII, principalmente a través del comercio de esclavos (Carney, 2001). Es así como el arroz africano habría llegado a varios países de América como Brasil, Guyana, Surinam, El Salvador, Panamá, Guayana Francesa, Jamaica, Surinam (Portères, 1976; Carney, 1998; Nayar, 2010; Van Andel, 2010) y al Estado de Carolina (Vaughan, 1994; Carney, 2005; van Andel, 2010; van Andel et al., 2016) y Georgia en U.S.A. (Carney, 2015), donde se usaba como alimento y en algunas actividades ceremoniales (Linares, 2002; Van Andel, 2010).

Para América, la incorporación del cultivo del arroz africano constituyó un legado económico y cultural importante de África Occidental. Además, constituyó un alimento de primera necesidad para los esclavos fugitivos de las Guyanas, Brasil, México, Centroamérica y el Caribe, y de autoconsumo para la población del sur de U.S.A., Brasil y Cuba (Carney, 2015).

Introducción y distribución del arroz asiático en el continente africano

El comercio de Asia con África significó la introducción de plantas y animales que permitieron suplementar la falta de alimentos, medicinas, cosméticos y productos suntuarios, escasos y lujosos.

En este contexto, el arroz y el azúcar fueron considerados como productos alimenticios, medicinales y en algunos casos suntuarios (Figura 12).

El proceso de introducción del arroz asiático al continente africano no está muy clara, por lo cual se plantean varias alternativas en relación a quienes fueron los responsables y el tiempo de introducción: a) al este de África a través del Océano Índico (Crowther et al., 2018) por comerciantes provenientes de India en el siglo I a. C. (Linares, 2002) o en la Edad del Hierro; b) por comerciantes y misioneros árabes provenientes de Egipto (Semon et al., 2005; Boivin et al., 2014) o por misioneros españoles (Maji et al., 2017); c) a la costa occidental de África (Senegal, Guinea-Bissau y Sierra Leona) por portugueses, alrededor del año 1.500 (Portères, 1962; Linares, 2002; Sarla y Swamy, 2005; Sweeney y McCouch, 2007; Nayar, 2012; Maji et al., 2017); d) por inmigrantes provenientes de Malasia e Indonesia entre los siglos VII y XII, o por los comerciantes musulmanes en las costas de Kenia, aunque no lograron que el arroz se diseminara a otros lugares de África (Carney, 2001).

Las primeras introducciones del arroz asiático fueron facilitadas por los propios agricultores africanos que ya tenían un sistema de producción de arroz bien desarrollado en la zona (Carney, 2001). Pero fue hasta el período Medieval/Islámico cuando las introducciones de los cultivos, entre ellos el arroz, empezaron a impactar en la alimentación africana. Por ejemplo, en la costa oriental de África se produjo un aumento considerable del consumo de arroz en la primera parte del 2.000 a. C. (Boivin et al., 2014) y una disminución hasta 1.500 a. C. Esta situación coincidió con el aumento de la producción de frutos oleaginosos y algodón de mayor valor comercial, y del comercio de esclavos que afectó la disponibilidad de mano de obra (Champion y Fuller, 2018).

Actualmente, el Centro Internacional de Arroz Africano (AfricaRice) es una de las instituciones dedicadas a almacenar, caracterizar y mejorar el germoplasma de arroz africano. El banco de germoplasma del AfricaRice contiene alrededor de 20.000 accesiones de arroz, de las cuales alrededor de 3.900 accesiones pertenecen a *O. glaberrima*. Algunas de las accesiones de *O. glaberrima* (Orjuela et al., 2014; Meyer et al., 2016; Ndjiondop et al., 2017; 2018a; Singh et al., 2019) y de especies silvestres (*O. longistimata*, *O. barthii* y *O. stapfii*) han sido caracterizadas y utilizadas en los programas de mejoramiento genético del arroz africano (Sié et al., 2012), a pesar de la barrera genética existente cuando se realizan cruzamientos interespecíficos entre *O. sativa* y *O. glaberrima* (Jones et al., 1997; Xie et al., 2019; Koide et al., 2008; 2018).

Camerún La primera información del cultivo de arroz está fechada en 1930 en la parte norte del país. En 1950 se creó la Estación Experimental de Rizicultura de Pauus, para atender las necesidades del cultivo de arroz en esta zona. En 1954 se creó la Sociedad de Expansión y Modernización del Arroz de Yagouna (en inglés SEMRY) que le dio un importante empuje a la expansión del cultivo del arroz y a la construcción de infraestructura de riego apta para el desarrollo del cultivo (Goufo, 2008).

Egipto. Una hipótesis señala que el arroz fue introducido a Egipto desde la India por los comerciantes hindúes a finales del siglo I a. C., quienes habrían usado los puertos de Berenice y Myos Hormos para la entrada y salida de productos provenientes de la India, del Sudeste Asiático y del sur de Arabia. Otra hipótesis plantea que el cultivo del arroz pudo haber sido introducido por los árabes que ocuparon Egipto en 642 a. C., quienes promovieron su cultivo y llegaron a establecer algunas zonas de producción de arroz en el país (Ruf, 1993; Van der Veen, 2011).

Madagascar y Comoras. Datos arqueobotánicos indican que el arroz fue introducido a Madagascar y a las islas Comoras por colonizadores provenientes del sur de Asia (Carney, 2001; Fuller et al., 2010b; Crowther et al., 2016) a diferencia de la introducción por comerciantes ocurrida en otras regiones de África (Crowther et al., 2016).

Otros estudios plantean que dos olas de migrantes podrían haber introducido el arroz a Madagascar a través del Océano Índico (Boivin et al., 2013). La primera oleada está asociada con la expansión de los habitantes austronésicos, especialmente desde Malasia y Java, entre d. C. 400 y 1.000 al este de Madagascar, donde se introdujo el arroz del tipo *japonica* tropical por los malasios provenientes de Indonesia. La segunda migración a Madagascar habría introducido el arroz tipo *indica* en forma más masiva, aproximadamente entre 800 y 1.400 años atrás (Mather et al., 2010).

El arroz encontrado en las islas Comoras, y posiblemente en Madagascar, pertenecía a una mezcla de los tipos *indica* y *japonica*, lo que apoya la hipótesis que los primeros cultivos del arroz introducidos fueron una mezcla de ellos (Crowther et al., 2016), como ocurrió en el sur de Asia (Castillo et al., 2016; Crowther et al., 2016), con presencia de hibridación entre ambos tipos de arroz y reducida diversidad genética y separación de grupos adaptados a zonas específicas de Madagascar (Khush, 1997; Koji, 1997; Mather et al., 2010; Radanielina et al., 2013).

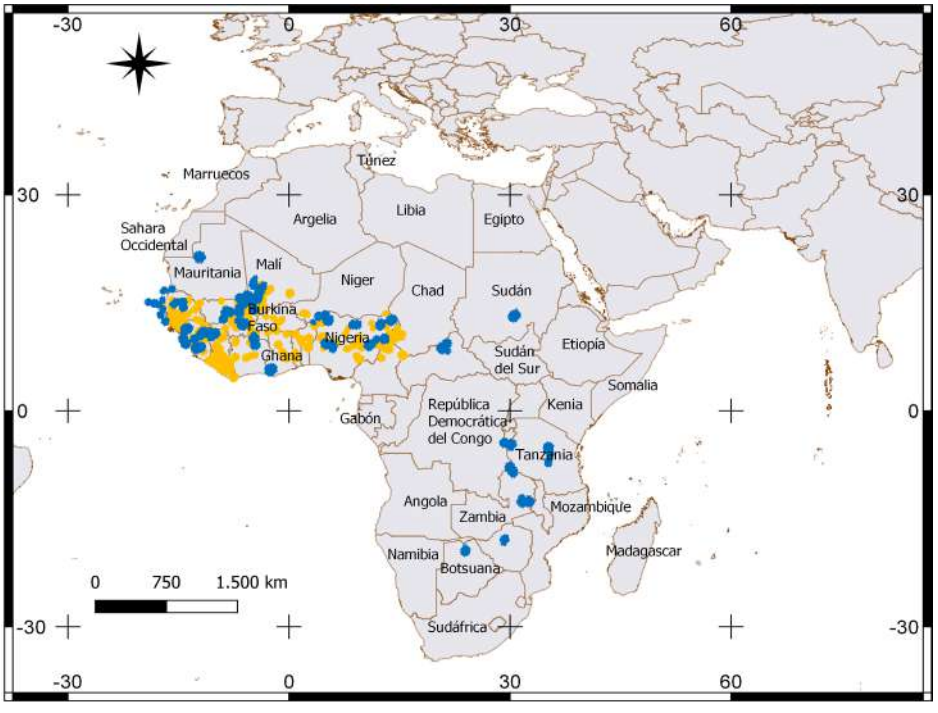


Figura 12. Distribución actual del arroz en África (Adaptado de Vincent et al., 2013).

Tanzania. Un estudio de restos arqueológicos en el norte de la Isla de Pemba, Tanzania, mostró que sus habitantes dependían fuertemente del cultivo del mijo, pero posteriormente se habían especializado en el cultivo del algodón, arroz y coco, producto del crecimiento del comercio con la ciudad de Chwaka durante los siglos XI y XV, lo cual coincide con el período de mayor urbanización e islamización de la costa este de África (Walshaw, 2010).

Consideraciones finales

El género *Oryza* está compuesto de 22 especies, de las cuales *O. sativa* (arroz asiático) y *O. glaberrima* (arroz africano) son cultivadas. Las especies silvestres han sido utilizadas como fuentes de genes para mejorar características productivas del arroz asiático. Este último posee una amplia distribución geográfica, a diferencia del arroz africano que está prácticamente reducido a una pequeña superficie en la parte Occidental de África. En el arroz asiático se pueden distinguir varios grupos: *indica*, *japonica* tropical, *japonica* templado, *aus* y *aromatico*. El origen del arroz *japonica* es ubicado en la zona sureste de China, donde actualmente se plantea la presencia de varios centros de domesticación, a diferencia del arroz *indica*, *aus* y *aromatico*, cuyo origen estaría en la India, aunque el origen de cada uno de ellos es diferente. El progenitor silvestre del arroz *japonica* es una población del complejo *O. rufipogon*, a diferencia del arroz *indica* cuyo posible origen está en el cruzamiento y retrocruzamientos del arroz proto-*indica* (*O. nivara*) con el arroz *japonica* proveniente de China. En el del arroz *aus* está en poblaciones del complejo *O. rufipogon* y en el arroz *aromatico* en la descendencia de un cruzamiento entre poblaciones silvestres locales y el arroz *japonica* proveniente de China. Además de estos grupos genéticos diferentes, existen, comercialmente, el arroz glutinoso y el arroz pigmentado que pueden estar presentes en algunos de los grupos mencionados anteriormente. Finalmente, el progenitor silvestre del arroz africano es *O. barthii*.

Referencias

Agnoun, Y., Biaou, S., Sié, M., et al. 2012. The African rice *Oryza glaberrima* Steud.: Knowledge distribution and prospects. Int. J. Biol. 4:158-180.

Ali, M., McClung, A., Jia, M., et al. 2012. A rice diversity panel evaluated for genetic and agro-morphological diversity between subpopulations and its geographic distribution. Crop Sci. 51:20121-2015.

Banterng, P., Joralee, A. 2015. Evaluation of black glutinous rice genotypes for stability of gamma oryzanol and yield in tropical environment. Turk. J. Field Crops 20:142-149.

Barker, R. 2011. The origin and spread of early-ripening Champa rice: It´s impact on Song Dynasty China. Rice 4:184-186.

Barry, M., Pham, J., Noyer, J., et al. 2007. Genetic diversity of the two cultivated rice species (*O. sativa* & *O. glaberrima*) in Maritime Guinea. Evidence for interspecific recombination. Euphytica 154:127-137.

Barton, L., Newsome, S., Chen, F-H., et al. 2009. Agricultural origins and the isotopic identity of domestication in northern China. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106:5523-5528.

Bates, J., Petrie, C.A., Singh, R.N. 2017. Approaching rice domestication in South Asia: New evidence from Indus settlements in northern India. J. Archaeol. Sci. 78:193-201.

Bates, J., Singh, R., Petrie, C. 2016. Exploring Indus crop processing: combining phytolith and macrobotanical analyses to consider the organization of agriculture in northwest India c.3200-1500 BC. Veg. Hist. Archaeol. (special issue) 26:25-41.

Bellwood, P. 2005. First farmers: the origins of agricultural societies. Oxford University Press, Oxford, UK.

Bellwood, P. 2011. The checkered prehistory of rice movement southwards as a domesticated cereal-from the Yangzi to the Equator. Rice 4:93-103.

Bernier, J., Kumar, A., Venuprasad, R., et al. 2009. Characterization of the effect of a QTL for drought resistant in rice, *qtl12.1*, over a range of environments in the Philippines and eastern India. Euphytica 166:207-217.

Bin Rahman, A., Zhang, J. 2013. Rayada specialty: the forgotten resource of elite features of rice. Rice 6:41.

Bin Rahman, A., Zhang, J. 2016. Flood and drought tolerance in rice: opposite but may coexist. Food Energy Sec. 5:76-88.

Boivin, N., Crowter, A., Helm, R., et al. 2013. East Africa and Madagascar in the Indian Ocean world. J. World Prehist. 26:213-281.

Boivin, N., Crowther, A., Prendergast, M., et al. 2014. Indian Ocean food globalization and Africa. Afr. Archaeol. Rev. 31:547-581.

Boivin, N., Fuller, D., Crowther, A. 2012. Old world globalization and the Columbian exchange: Comparison and contrast. World Archaeol. 44:452-469.

Boivin, N., Fuller, D., Korissettar, R., et al. 2006. First farmers in South India: the role of internal processes and external influences in the emergence and transformation of South India's earliest settled societies. Pragdhara 18:180-199.

Boonsit, P., Pongpiachan, P., Julsrigival, S., et al. 2010. Gamma oryzanol content in glutinous purple rice landrace varieties. C.M.U. J. Nat. Sci. 9:151-157.

Bourgis, F., Guyot, R., Gherbi, H., et al. 2008. Characterization of the major fragrance gene from an *aromatic japonica* rice and analysis of its diversity in Asian Cultivated rice. Theor. Appl. Genet. 117:353-368.

Bradbury, L., Fitzgerald, T., Henry, R., et al. 2005. The gene for fragrance in rice. Plant Biotechnol. J. 3:363-370.

Bradley, D. 2011. Proto-Tibeto-Burman grain crops. Rice 4:134-141.

Brooks, S., Yan, W., Jackson, A., et al., 2008. A natural mutation in *rc* reverts white pericarp to red and results in a new, dominant, wild type allele: *Rc-g*. Theor. Appl. Genet. 117:575-580.

Brozynska, M., Furtado, A., Henry, R. 2016: Genomics of crop wild relatives: expanding the gene pool for crop improvement. Plant Biotechnol. J. 14:1070-1085.

Butardo, V., Anacleto, R., Parween, S., et al. 2017. Systems genetics identifies a novel regulatory domain of amylose synthesis. Plant Physiol. 173:887-906.

Cai, H., Morishima, H. 2000. Diversity of rice varieties and cropping system in Bangladesh deepwater areas. JARQ. Jpn. Agron. Res. Q. 34:225-231.

Caicedo, A., Williamson, S., Hernandez, R., et al. 2007. Genome-wide patterns of nucleotide polymorphism in domesticated rice. PLoS Genet. 3:1745-1756.

Calingacion, M., Laborte, A., Nelson, A., et al. 2014. Diversity of global rice markets and the science required for consumer-targeted rice breeding. PLoS ONE 9:1-12.

Carney, J. 1998. The role of African rice and slaves in the history of rice cultivation in the Americas. Human Ecol. 26:525-545.

Carney, J. 2001. African rice in the Columbian exchange. J. Afr. Hist. 42:377-396.

Carney, J. 2002. Black rice. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

Carney, J. 2005. Rice and memory in the age of enslavement: Atlantic passages to Suriname, slavery and abolition. Slav. Abol. 26:1217-1228.

Carney, J. 2015. El origen africano del cultivo del arroz en las Américas. Asclepio 67(1):p077.

Casartelli, A., Riewe, D., Hubberten, H., et al. 2018. Exploring traditional *aus*-type rice for metabolites conferring drought tolerance. Rice 11:9.

Castillo, C., Tanaka, K., Sato, Y., et al. 2016. Archaeogenetic study of prehistoric rice remains from Thailand and India: Evidence of early *japonica* in South and Southeast Asia. Archaeol. Anthropol. Sci. 8:523-543.

Catling, H. 1992. Rice in deep water. McMillan Press, London, UK.

Champion, L., Fuller, D. 2018. New evidence on the development of millet and rice economies in the Niger river basin: archaeological results from Benin. p. 529-547. In Mercuri, A.M., D´Andrea, A.C., Fornaciari, R. (eds.) Plant and people in the African past. Springer Nature, Switzerland.

Chang, 1976. The origin, evolution, cultivation, dissemination, and diversification of Asian and African rices. Euphytica 25:425-441.

Chen, F., Dong, G., Zhang, D., et al. 2015. Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 BP. Science 347:248-250.

Chen, C., He, W., Nassirou, T., et al. 2017. Molecular characterization and genetic diversity of different genotypes of *O. sativa* and *Oryza glaberrima*. Electron. J. Biotecnol. 30:48-57.

Chen, G., Zhou, X., Wang., J., et al. 2020. Kushan Period rice in the Amu Darya Basin: evidence for prehistoric exchange along the southern Himalaya. Sci. Chin. Earth Sci. 63: 841.

Cheng, A., Han, X., Wu, Y., et al. 2014. The function and catalysis of 2-oxoglutarate-dependent oxygenases involved in plant flavonoid biosynthesis. Int. J. Mol. Sci. 15:1080-1095.

Cheng, C., Motohashi, R., Tsuchimoto, S., et al. 2003. Polyphyletic origin of cultivated rice: based on the interspersion pattern of SINEs. Mol. Biol. Evol. 20:67-75.

Choi, J., Groen, S., Zaaijer, S., et al. 2018. Nanopore sequence-based genome assembly of the basmati rice. Preprint at https://doi.org/10.1101/396515.

Choi, J., Platts, A., Fuller, D., et al. 2017. The rice paradox: Multiple origins but single domestication in Asian rice. Mol. Biol. Evol. 34:969-979.

Choi, J., Purugganan, M. 2018. Multiple origin but single domestication led to *Oryza sativa*. G3-Genes Genom. Genet. 8:797-803.

Choi, J., Zaidem, M., Gutaker, R. 2019. The complex geography of domestication of the African rice *Oryza glaberrima*. PLoS Genet. 15(3):e1007414.

Cicero, A., Gaddi, A. 2001. Rice bran oil and gamma-oryzanol in the treatment of hyperlipoproteinaemias and other conditions. Phytother. Res. 15:277-289.

Civán, P., Ali, S., Batista-Navarro, R., et al. 2019. Origin of the aromatic group of cultivated rice (*Oryza sativa* L.) traced to the Indian Subcontinent. Genome Biol. Evol. 11:832-843.

Civán, P., Brown, T. 2016. Diversity patterns across 1,800 chloroplast genomes of wild (*Oryza rufipogon* Griff.) and cultivated rice (*O. sativa* L.) Preprint at http://dx.doi.org/10.1101/094482.

Civán, P., Brown, T. 2017. Origin of rice (*Oryza sativa* L.) domestication genes. Genet. Res. Crop Evol. 64:1125-1132.

Civán, P., Brown, T. 2018. Role of genetic introgression during the evolution of cultivated rice (*Oryza sativa* L.) BMC Evol. Biol. 18:57.

Civán, P., Graig, H., Cox, C., et al. 2015. Three geographical separate domestications of Asian rice. Nat. Plants 1:15164.

Clark, J. 1967. The problem of Neolithic culture in Sub-Saharan Africa. p. 601-627. In Bishop, W., Clark, J. (eds.) Background to evolution in Africa. Chicago University Press, Chicago, USA.

Cobo, J., Fort, J., Isern, N. 2019. The spread of domesticated rice in Eastern and Southeastern Asia was mainly demic. J. Archaeol. Sci. 101:123-130.

Cohen, D.J. 2011. The beginnings of agriculture in China: a multiregional view. Curr. Anthropol. 52(Suppl. 4):S273-S293.

Constantini, L. 2008. The first farmers in western Pakistan: the evidence of Neolithic agro-pastoral settlement of Mehrgarh. Pragdhara 18:167-178.

Cooke, M., Fuller, D. 2015. Agricultural continuity and change during the Megalithic and Early Historic Period in South India. p. 445-476. In Basa, K., Mohanty, R., Ota, S. (eds.) Megalithic traditions in India. Archaeology and Ethnography. Vol II. Application of Scientific Techniques & Ethnographic Studies. Indira Gandhi Rasthtriya Manav Sangrahalaya, Aryan Books International, New Delhi, India.

Crawford, G., Chen, X., Luan, F., et al. 2016. People and plant interaction at the Houli culture Yuezhuang site from Shandong province, China. The Holocene 26:1594-1604.

Crawford, G., Chen, X., Wang, J. 2006. Houli culture rice from the Yuezhuang site, Jinan. East Asia Archaeol. 3:247-251.

Crawford, G., Underhill, A., Zhao, Z., et al. 2005. Late Neolithic plant remains from Northern China: preliminary results from Liangchengzhen, Shandong. Curr. Anthropol. 46:309-317.

Crowther, A., Lucas, L., Helm, R., et al. 2016. Ancient crops provide first archaeological signature of the westward Austronesian expansion. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 113:6635-6640.

Crowther, A., Prendergast, M., Fuller, D., et al. 2018. Subsistence mosaics, forager-farmer interactions, and the transition to food production in eastern Africa. Quat. Int. 489:101-120.

Cubry, P., Tranchant-Dubreuil, C., Thuillet, A., et al. 2018. The rise and fall of African rice cultivation revealed by analysis of 246 new genomes. Curr. Biol. 28:1-9.

D´Alpoim Guedes, J. 2011. Millet, rice, social complexity, and the spread of agriculture to the Chengdu Plain and Southern China. Rice 4:104-113.

D´Alpoim Guedes, J., Butler, E. 2014. Modeling constraints on the spread of agriculture to the Southwest China with thermal niche models. Quat. Int. 349:29-41.

D´Alpoim Guedes, J., He, K., We, X., et al. 2013. Site Baodun yield earliest evidence for the spread of rice and foxtail millet agriculture to south-west China. Antiquity 87:758-771.

D´Alpoim Guedes, J., Jin, G., Bocinnsky, K. 2015. The impact of climate on the spread of rice to north-eastern China: A new look at the data from Shandong Province. PLoS ONE 10:e0130430.

Dal Martello, R., Min, R., Stevens, C., et al. 2018. Early agriculture at the crossroads of China and Southeast Asia: Archaeobotanical evidence and radiocarbon dates from Baiyangcun, Yunnan. J. Archaeol. Sci. Rep. 20:711-721.

De Wet, L., Oelke, E. 1978. Domestication of American wild rice (*Zizania aquatic* L., Gramineae). J. d'Agric. Trad. Bot. Appl. 25:67-74.

Deng, Z., Hung, H-C., Carson, M., et al. 2018. The first discovery of Neolithic rice remains in eastern Taiwan: phytolith evidence from Chaolaiqiao site. Archaeol. Anthropol. Sci. 10:1477-1484.

Deng, Z., Qin, L., Gao, Y., et al. 2015. From early domesticated rice of the Middle Yangtze basin to millet, rice and wheat agriculture: archaeobotanical macro-remains from Baligang, Nayang Basin, Central China (6700-500 BC). PLoS ONE 10(10):e0139885.

Dingkuhn, N., Jones, M., Johnson, E., et al. 1988. Growth and yield potential of *Oryza sativa* and *O. glaberrima* upland rice cultivars and their interspecific progenies. Field Crops Res. 57:57-69.

Dramé, K., Sanchez, I., Gregorio, G., et al. 2011. Suitability of a selected set of simple sequence repeats (SSR) markers for multiplexing and rapid molecular characterization of African rice (*Oryza glaberrima* Steud.). Afr. J. Biotechnol. 10:6675-6685.

Duan, S., Lu, B., Li, Z., et al. 2007. Phylogenetic analysis of AA-genome *Oryza* species (Poaceae) based on chloroplast, mitochondrial and nuclear DNA sequences. Biochem. Genet. 45:113-129.

Fatakuchi, K., Sié, M. 2009. Better exploitation of African rice (*Oryza glaberrima* Steud.) in varietal development for resource-poor farmers in West and Central Africa. Agric. J. 4:96-102.

Ferrari, B., Gianinetti, A., Finocchiaro, F., et al. 2015. *Rc* gene sequence and expression evaluation in a red-kernel rice. J. Rice Res. 3:145.

Fitzgerald, M., Sackville, H., Calingacion, M., et al. 2008. Is there a second fragance gene in rice? Plant Biotechnol. J. 6:416-423.

Fofana, B., Rauber, R. 2000. Weed suppression ability of upland rice under low-input conditions in West Africa. Weed Res. 40:271-280.

Fujino, K., Yamanouchi, U., Yano, M. 2013. Roles of the *Hd5* gene controlling heading date for adaptation to the northern limits of rice cultivation. Theor. Appl. Genet. 126:611-618.

Fuller, D. 2006. Agricultural origins and frontiers in South Asia: A working synthesis. J. World Prehist. 20:1-86.

Fuller, D. 2007. Contrasting patterns in crop domestication and domestication rates: recent archaeobotanical insights from the Old World. Ann. Bot. 100:903-924.

Fuller, D. 2011a. Finding plant domestication in the Indian subcontinent. Curr. Anthropol. 52: S347-S362.

Fuller, D. 2011b. Pathways to Asian civilizations: tracing the origins and spread of rice and rice cultures. Rice 4:78-92.

Fuller, D., Allaby, R., Stevens, C. 2010a. Domestication as innovation: the entanglement of techniques, technology and chance in the domestication of cereals crops. World Archaeol. 42:13-28.

Fuller, D., Asouti, E., Purugganan, M. 2012a. Cultivation as slow evolutionary entanglement: comparative data on rate and sequence of domestication. Veg. Hist. Archaeobot. 21:131-145.

Fuller, D., Boivin, N., Korisettar, R. 2007a. Dating the Neolithic of South India: new radiometric evidence for key economic, social and ritual transformations. Antiquity 81:755-778.

Fuller, D., Castillo, C. 2015. Diversification and cultural construction of a crop: The case of glutinous rice and waxy cereals in the food cultures of Eastern Asia. In Lee-Thorp, J., Katzenberg, A. (eds.) The Oxford Handbook of the Archaeology of diet. doi:10.1093/oxfordhb/9780199694013.013.8.

Fuller, D., Castillo, C., Murphy, C. 2016a. How rice fail to unify Asia. Globalization and regionalism of early farming traditions in the monsoon world. p. 711-729. In Hodos, T., Stark, M. (eds.) The Routledge handbook of archaeology and globalization. Routledge, London, UK.

Fuller, D., Denham, T., Arroyo-Kalin, M., et al. 2014. Convergent evolution and parallelism in plant domestication revealed by an expanding archaeological record. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 111:6147-61-52.

Fuller, D., Harvey, E., Qin, L. 2007b. Presumed domestication? Evidence for rice cultivation and domestication in the fifth millennium BC of the lower Yangtze region. Antiquity 81:316-331.

Fuller, D., Murphy, C. 2014. Overlooked but not forgotten: India as a Center for agricultural domestication. Gen. Anthropol. 21:4-8.

Fuller, D., Qin, L. 2009. Water management and labor in the origins and dispersal of Asian rice. World Archaeol. 41:88-111.

Fuller, D., Qin, L. 2010. Declining oaks, increasing artistry, and cultivating rice: the environmental and social context of the emergence of farming in the lower Yangtze region. Environ. Archaeol. 15:139-159.

Fuller, D., Qin, L., Harvey, E. 2008. A critical assessment of early agriculture in East Asia, with emphasis on Lower Yangtze rice domestication. Pradghara 18:17-52.

Fuller, D., Qin, L., Zheng, Y., et al. 2009. The domestication process and domestication rate in rice: spikelet bases from the lower Yangtze. Science 341:65-67.

Fuller, D., Rowlands, M. 2011. Ingestion and food technologies: Maintaining differences over the long-term in West, South and East Asia. p. 37-60. In Wilkinson, T., Sherratt, S., Bennet, J. (eds.) Interweaving worlds: Systemic interactions in Eurasia, 7th to the 1st Millennia BC. Oxbow Books, Oakville, Oxford, UK.

Fuller, D., Sato, Y. 2008. *Japonica* rice carried to, not from, Southeast Asia. Nat. Genet. 40:1264-1265.

Fuller, D., Sato, Y., Castillo, C., et al. 2010b. Consilience of genetics and archaeobotany in the entangles history of rice. Archaeol. Anthropol. Sci. 2:115-131.

Fuller, D., van Etten, J., Manning, K., et al. 2011. The contribution of rice agriculture and livestock pastoralism to prehistoric methane levels. An archaeological assessment. The Holocene 21:1-17.

Fuller, D., Weisskopf, A. 2011. The early rice project: from domestication to global warming. Archaeol. Int. 13:44-51.

Fuller, D., Weisskopf, A., Castillo, C. 2016b. Pathways of rice domestication across Asia. Archaeol. Int. 19:84-96.

Fuller, D., Willcox, G., Allaby, R. 2012b. Early agricultural pathways: moving outside the ´core area` hypothesis in southwest Asia. J. Exp. Bot. 63:617.633.

Furukawa, T., Maekawa, M., Oki, T., et al. 2007. The *Rc* and *Rd* genes are involved in proanthocianidin synthesis in rice pericarp. Plant J. 49:91-102.

Gamuyao, R., Chin, J., Pariasca-Tanaka, J., et al. 2012. The protein kinase Psto11 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. Nature 488:535-539.

Gao, Y., Dong, G., Yang, X., et al. 2020. A review on the spread of prehistoric agriculture from southern China to mainland Southeast Asia. Sci. China Earth Sci. 65:615-625.

Gao, D., He, B., Zhou, Y., et al. 2011. Genetic and molecular analysis of a purple sheath somaclonal mutant in *japonica* rice. Plant Cell Rep. 30:901-911.

Gao, L., Innan, H. 2008. Non-independent domestication of the two rices subspecies, *Oryza sativa* ssp. *indica* and ssp. *japonica*, demonstrated by multilocus microsatellites. Genetics 179:965-976.

Garris, A., McCouch, S., Kresovich, S. 2003. Population structure and its effects on haplotype diversity and linkage disequilibrium surrounding the *Xa5* locus of rice (*Oryza sativa* L.) Genetics 165:759-769.

Garris, A., Tai, T., Cobun, J., et al. 2005. Genetic structure and diversity in *Oryza sativa* L. Genetics 169:1631-1638.

Gaur, A., Wani, S., Oandita, D., et al. 2016. Understanding the fragrance in rice. J. Rice Res. 4:e125.

Gavarito, A., Guyot, R., Lozano, J., et al. 2010. A genetic model for the female sterility barrier between Asian and African cultivated rice species. Genetics 185:1425-1440.

Ge, S., Sang, T., Lu, B., et al. 1999. Phylogeny of rice genomes with emphasis on origins of allotetraploid species. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 96:14400-14405.

Glaszmann, J. 1987. Isozymes and classification of Asian rice varieties. Theor. Appl. Genet. 74:21-30.

Goufo, P. 2008. Rice production in Cameroon: a review. Res. J. Agric. Biol. Sci. 4:745-756.

Grombacher, A., Porter, R., Everett, L. 1997. Breeding wild rice. Plant Breed. Rev. 14:237-265.

Gross, B., Steffen, F., Olsen, K. 2010. The molecular basis of white pericarps in African domesticated rice: novel mutations at the *Rc* gene. J. Evol. Biol. 23:2747-2753.

Gross, B., Zhao, Z. 2014. Archaeological and genetics insights into the origins of domesticated rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 111:6190-6197.

Gunaratne, A., Wu, K., Li, D., et al. 2013. Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins. Food Chem 138:1153-1161.

Gutaker, R., Groen, S., Bellis, E., et al. 2020. Genomic history and ecology of the geographic spread of rice. Nat. Plants 6:492-502.

Harushima, Y., Nakagahra, M., Yano, S., et al., 2002. Diverse variation of reproductive barriers in three intraspecific rice crosses. Genetics 160:313-322.

Harvey, E., Fuller, D., Mohanty, R., et al. 2006. Early agriculture in Orissa: Some archaeobotanical results and field observations on the Neolithic. Man Environ. 31:21-32.

Hattori, Y., Nagai, K., Furukawa, S., et al. 2009. The ethylene response factor *SNORKEL 1* and *SNORKEL 2* allow rice adapt to deep water. Nature 460:1026-1030.

He, K., Lu, K., Zhang, J., et al. 2017. Prehistoric evolution of the dualistic mixed rice and millet farming in China. Holocene 27:1885-1898.

He, Z., Zhai, W., Wen, H., et al. 2011. Two evolutionary histories in the genome of rice: the role of domestication genes. PLoS Genetics 7(6):e1002100.

Hsieh, J., Hsing, T., Hsu, P., et al. 2011. Studies in ancient rice-where botanists, agronomists, archaeologists, linguistics, and ethnologist meet. Rice 4:178-183.

Hu, M., Lv, S., Wu, W., et al. 2018. The domestication of plant architecture in African rice. Plant J. 94:661-668.

Hu, H., Mu, J., Zhang, H-J., et al. 2006. Differentiation of a miniature inverted transposable element (MITE) system in Asian rice cultivars and its inference for a diphyletic origin of two sub-species of Asian cultivated rice. J. Int. Plant Biol. 48:260-267.

Hua, L., Wang, D., Tan, L., et al. 2015. *LABA1*, a domestication gene associated with long, barbed awns in wild rice. Plant Cell 27:1875-1888.

Huang, X., Han, B. 2016. Rice domestication occurred through single origin and multiple introgressions. Nat. Plants 2:15207.

Huang, X., Kurata, N., Wei, X., et al. 2012. A map of rice genome variation reveals the origin of cultivated rice. Nature 490:497-501.

Huang, X., Zhao, Q., Han, B. 2015. Comparative population genomics reveals strong divergence and infrequent introgression between Asian and African rice. Mol. Plant 8:958-960.

Hung, H. 2019. Prosperity and complexity without farming: the south China coast, c.5000-3000 BC. Antiquity 93:325-341.

Hung, H., Carson, M. 2014. Foragers, fishers and farmers: origins of Taiwanese Neolithic. Antiquity 88:1115-1131.

Ikehashi, H. 2014. Domestication and long-distance dissemination of rice: a revised version. J. Rice Res. 3:128.

Jain, S., Jain, K., McCouch, S. 2004. Genetic analysis of Indian aromatic and quality rice (*Oryza sativa* L.) germplasm using panels of fluorescently-labeled microsatellites markers. Theor. Appl. Genet. 109:965-977.

Jiang, L., Liu, L. 2006. New evidence for the origins of sedentism and rice domestication in the lower Yangzi River, China. Antiquity 80:355-361.

Jin, G., Wagner, M., Tarasov, P., et al. 2016. Archaeobotanical records of Middle and Late Neolithic agriculture from Shandong Province, East China, and a major change in regional subsistence during the Dawenkou Culture. The Holocene 26:1605-1615.

Jin, G., Wu, W., Zhang, K., et al. 2014. 8000-year old rice remains from the north edge of the Shandong highlands, East China. J. Archaeol. Sci. 51:34-42.

Jones, M., Dingkuhn, M., Aluro, K., et al. 1997. Interspecific *O. sativa* L. x *O. glaberrima* Steud: progenies in upland rice improvement. Euphytica 92:237-246.

Juliano, B. 1972. Physicochemical properties of starch and protein in relation to grain quality and nutrition value of rice. p. 389-404. In Rice breeding. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Manila, Philippines.

Juliano, B. 1985. Rice: Chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA.

Juliano, B., Villareal, C. 1993. Grain quality evaluation of world rices. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Manila, Philippines.

Kawakami, S., Ebana, K., Nishikawa, T., et al. 2007. Genetic variation in the chloroplast genome suggests multiple domestication of cultivated Asian rice (*Oryza sativa* L.) Genome 50:180-187.

Khush, G. 1997. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. Plant Mol. Biol. 35:25-34.

Kim, H., Jung, J., Singh, N., et al. 2016. Population dynamics among six major groups of the *Oryza rufipogon* species complex, wild relative of cultivated Asian rice. Rice 9:56.

Kim, D., Park., Lee, J., et al. 2018. A rice B-Box protein, OsBBX14, finely regulates anthocyanin biosynthesis in rice. Int. J. Mol. Sci. 9:E2190.

Kingwell-Banham, E. 2019. Dry, rainfed or irrigated? Reevaluating the role and development of rice agriculture in Iron Age Historic South India using archaeobotanical approaches. Archaeol. Anthropol. Sci. 11:6485-6500.

Kingwell-Banham, E., Fuller, D. 2012. Shifting cultivators in South Asia: Expansion, marginalization and specialization over the long term. Quat. Int. 249:84-95.

Kingwell-Banham, E., Harvey, K., Mohanty, R., et al. 2018. Archaeological investigations into Golbai Sasa and Gopalpur, two Neolithic-Chalcolithic settlements of Odisha. Ancient Asia 9:1-14.

Kingwell-Banham, E., Petrie, C., Fuller, D. 2015. Early agriculture in South Asia. p. 261-288. In Barker, G., Goucher C. (eds.) In The Cambridge world history. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kinoshita, T., Maekawa, M. 1986. Genetical studies on rice plants. XCIV. Inheritance of purple leaf color found in *indica* rice. J. Fac. Agr. Hokkaido Univ. 62:453-467.

Klee, M., Zach, B., Bliss, H. 2004. Four thousand years of plant exploitation in the Lake Chad Basin (Nigeria), Part III: plant impressions in potsherds from the final Stone Age Gajiganna Culture. Veg. Hist. Archaeobot. 13:131-142.

Klee, M., Zach, B., Neumann, K. 2000. Four thousand years of plant exploitation in the Chad Basin of northeast Nigeria. I. The archaeobotany of Kursakata. Veg. Hist. Archaeobot. 9:223-237.

Koide, Y., Ogino, A., Yoshikawa, T., et al. 2018. Lineage-specific gene acquisition or loss is involved in interespecific hybrid sterility in rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 115:E1955-E1962.

Koide, Y., Onishi, K., Nishimoto, D., et al. 2008. Sex-independent transmission ratio distortion system responsible for reproductive barriers between Asian and African rice species. New Phytol. 179:888-900.

Koide, Y., Pariasca-Tanaka, J., Rose, T., et al., 2013. QTLs for phosphorus deficiency tolerance detected in upland NERICA varieties. Plant Breed. 132:259-265.

Koji, T. 1997. Malayan cultivated rice and its expansion. Agric. Archaeol. 1:73-78.

Kovach, M., Calingacion, F., Fitzgerald, M., et al. 2009. The origin and evolution of fragrance in rice (*Oryza sativa* L.) Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106:14444-14449.

Kovach, M., Sweeney, M., McCouch, S. 2007. New insights into the history of rice domestication. Trends Genet. 23:578-587.

Kumar, D., Prakash, P. 2020. Bioactive compound of rice (*Oryza sativa* L.): review on paradigm and its potential benefit in human health. Trend Food Sci. Technol. 97:355-365.

Kushwaha, U. 2016. Black rice. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.

Kwon, S., Lee, J., Hong, S., et al. 2006. Genetic diversity and phylogenic relationship in AA *Oryza sativa* species as revealed by Rim2/Hipa CACTA transposon display. Genes Genet. Syst. 81:93-101.

Lanehart, R., Tykot, R., Underhill, A., et al. 2011. Dietary adaptation during the longshank period in China: stable isotope analyses at Liangchengzhen (southern Shandong). J. Archaeol. Sci. 38:2171-2181.

Lee, G., Crawford, G., Lu, L., et al. 2007. Plants and people from the Early Neolithic to Shang periods in north China. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 104:1087-1092.

Li, X., Liu, H., Wang, M., et al. 2015. Combinations of *Hd2* and *Hd4* genes determine rice adaptability to Heilongjiang province, northern limit of China. J. Integr. Plant Biol. 57:698-707.

Li, C., Zhang, D., Ge, S., et al. 2000. Identification of genomic constitution of three tetraploid *Oryza* species through two-probe genomics *in situ* hybridization. Int. Rice Res. Notes (IRRN) 25:19-22.

Li, Z., Zheng, X., Ge, S. 2011. Genetic diversity and domestication history of African rice (*Oryza glaberrima*) as inferred from multiple gene sequences. Theor. Appl. Genet. 123:21-31.

Li, C., Zhou, A., Sang, T. 2006a. Genetic analysis of rice domestication syndrome with the wild annual species, *Oryza nivara*. New Phytol. 170:185-193.

Li, C., Zhou, A., Sang, T. 2006b. Rice domestication by reducing shattering. Science 311:1936-1939.

Li, X, Zhou, X., Zhou, J., et al. 2007. The earliest archaeological evidence of the broadening agriculture in China recorded at Xishanping site in Gansu province. Sci. China D-Earth Sci. 50:1707-1714.

Li, H., Zuo, X., Kang, L., et al. 2016. Prehistoric development in the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China: archaeobotanical evidence. Sci. China Earth Sci. 59:1562-1573.

Limtrakul, P., Semmarath, W., Mapoung, S. 2019. Anthocyanins and proanthocyanidins in natural pigmented rice and their bioactivities. doi:10.5772/intechopen.86962.

Linares, O. 2002. African rice (*Oryza glaberrima*): History and future potential. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 99:16360-16365.

Lipson, M., Cheronet, O., Mallick, S., et al. 2018. Ancient genomes document multiples waves of migrations in Southeast Asian prehistory. Science 361:92-95.

Liu, R., Zheng, X., Zhou, L., et al. 2015. Population genetic structure of *Oryza rufipogon* and *Oryza nivara*: implications for the origin of *O. nivara*. Mol. Ecol. 24:5211-5228.

Londo, J., Chiang, Y., Hung, K., et al. 2006. Phylogeography of Asian wild rice, *Oryza rufipogon*, reveals multiple independent domestications of cultivated rice, *Oryza sativa*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103:9578-9583.

Lourith, N., Kanlayavattanakul, M. 2012. Antioxidant color of purple glutinous rice (*Oryza sativa*) color and its stability for cosmetic applications. Adv. Sci. Letter 5:1-4.

Lu, B., Zheng, K., Qian, H., et al. 2002. Genetic differentiation of wild relatives of rice as assessed by RFLP analysis. Theor. Appl. Genet. 106:101-106.

Luo, W., Yang, Y., Yao, L., et al. 2016. Phytolith records of rice agriculture during the Middle Neolithic in the middle reaches of Huai river region, China. Quat. Int. 426:133-140.

Lv, S., Wu, W., Wang, M. et al. 2018. Genetic control of seed shattering during African rice domestication. Nat. Plants 4:331-337.

Ma, J., Bennetzen, J. 2004. Rapid recent growth and divergence of rice unclear genomes. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 101:12404-12410.

Maeda H., Yamagushi, T., Omoteno, M., et al. 2014. Genetic dissection of black grain rice by the development of a near isogeneic line. Breed. Sci. 64:134-141.

Maji, A., Ukwungwu, M., Nahemiah, D., et al. 2017. Rice: history, research and development in Nigeria. p. 1-2. In Nahemiah, D., Nkama, I., Maji, A., et al. (eds.) Rice in Nigeria. Traditional recipes and research needs. National Rice Research Institute, Badeggi/Niger State, Nigeria.

Marcott, S., Shakun, J., Clark, P., et al. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. Science 339:1198-1201.

Mather, K., Molina, J., Flowers, J., et al. 2010. Migration, isolation and hybridization in island crop populations: the case of Madagascar rice. Mol. Ecol. 19:4892-4905.

McColl, H., Racimo, F., Vinner, L., et al. 2018. The prehistoric peopling of Southeast Asia. Science 361:88-92.

McIntosh, S.K. 1995. Excavations at Jenne-Jeno, Hambarketolo, and Kaniana (Inland Niger Delta, Mali); the 1981 Season. University of California Press, Berkeley, California, USA.

McNally, K., Childs, K., Bohnert, R., et al. 2009. Genome wide SNP variation reveals relationships among landraces and modern varieties of rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106:12273-12278.

Meyer, R., Choi, J., Sanches, M., et al. 2016. Domestication history and geographical adaptation inferred from a SNP map of African rice. Nat. Genet. 48:1083-1088.

Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2008. Thai aromatic rice. Thai Agricultural Standard TAS 4001-2008. National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand. ICS 67.060 Published in the Royal Gazette Vol. 125 Section 139 D, Bangkok, Thailand.

Misra, S. 2009. Farming system in Jeypore tract of Orissa, India. Asian Agr. Hist. 13:271-292.

Molina, J., Sikora, M., Garud, N., et al. 2011. Molecular evidence for a single evolutionary origin of domesticated rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 108:8351-8356.

Monat, C., Pera, B., Ndjiondjop, M., et al. 2016. *De novo* assemblies of three *Oryza glaberrima* accessions provide first insights about pan-genome of African rices. Genomes Biol. Evol. 9:1-6.

Morishima, H., Oka, H. 1970. A survey of genetic variations in the populations of wild *Oryza* species and their cultivated relatives. Jpn. J. Genet. 45:371-385.

Moukoumbi, Y., Sie, M., Vodouhe, R., et al., 2011. Screening of rice varieties for their weed competitiveness. Afr. J. Agric. Res. 6:5446-5456.

Murphy, C., Fuller, D. 2016. The transition to agricultural production in India: South Asian entanglements of domestication. p. 344-357. In Schung, G.R., Walimbe, S.R. (eds.) A companion to South Asian in the past. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.

Murray, S. 2004. Searching for the origins of African rice domestication. Antiquity 78:300.

Nabholz, B., Sarah, G., Sabot, F., et al. 2014. Transcriptome population genomics reveals severe bottleneck and domestication cost in the African rice (*Oryza glaberrima*). Mol. Ecol. 23:2210-2227.

Nagao, S., Takahashi, M. 1963. Genetical studies on rice plants. XXVII. Trial construction of twelve linkage groups in Japanese rice. J. Fac. Agri. Hokkaido Univ. 58:72-130.

Naik, S., Patnaik, J., Kingwell-Banham, E., et al. 2019. Archaeobotanical studies at Suabarei, Puri district, Odisha, India. Curr. Sci. 116:1373-1380.

Nakamura, S. 2010. The origin of rice cultivation in the Lower Yangtze region, China. Archaeol. Anthropol. Sci. 2:107-113.

Nasu, H., Gu, H., Momohara, A., et al. 2011. Land-use change for rice and foxtail millet cultivation in the Chengtoushan site, central China, reconstructed from weed seed assemblages. Anthropol. Sci. 4:1-14.

Nayar, N. 2010. The history and genetics transformation of the African rice, *Oryza glaberrima* Steud. (Gramineae). Curr. Sci. 99:1681-1689.

Nayar, N. 2012. Evolution of the African rice: a historical and biological perspective. Crop Sci. 52:505-512.

Ndjiondjop, M-N., Alachiotis, N., Pavlidis, P., et al. 2019. Comparisons of molecular diversity indices, selective sweeps and population structure of African rice with its wild progenitor and Asian rice. Theor. Appl. Genet. 132:1145-1158.

Ndjiondjop, M., Seck, P., Lorieux, M., et al. 2012. Effect of drought on *Oryza glaberrima* rice accessions and *Oryza glaberrima* derived-lines. Asian J. Agric. Res. 6:144-157.

Ndjiondjop, M-N., Semagn, K., Gouda, A., et al. 2017. Genetic variation and population structure of *Oryza glaberrima* and development of a mini-core collection using DArTseq. Front. Plant Sci. 8:1748.

Ndjiondjop, M-N., Semagn, K., Sow, M., et al. 2018a. Assessment of genetic variation and population structure of diversity rice genotypes adapted to lowland and upland ecologies in Africa using SNPs. Front. Plant Sci. 9:446.

Ndjiondjop, M., Semagn, K., Zhang, J., et al. 2018b. Development of species diagnostic SNP markers for quality control genotyping in four rice (*Oryza* L.) species. Mol. Breed. 38:131.

Nuijten, E., van Treuren, R. 2007. Spatial and temporal dynamics in genetic diversity in upland rice and late millet in The Gambia. Genet. Res. Crop Evol. 54:989-1009.

Nuijten, E., van Treuren, R., Struk, P., et al. 2009. Evidence for the emergence of new rice types of interspecific hybrid origin in West African farmers' fields. PLoS ONE 4:e7335.

OECD. 1999. Consensus document on the biology of *Oryza sativa* (Rice). Series on harmonization of regulatory oversight in biotechnology N° 14. ENV/JM/MONO (99)26. 52 p. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Paris, France.

Oh, H., Lee, Y., Byeon, E., et al. 2018. Whole-genome resequencing and transcriptomic analysis of genes regulating anthocyanin biosynthesis in black rice plants. 3 Biotech. 8:115.

Oikawa, T., Maeda, H., Oguchi, T., et al. 2015. The birth of a black rice gene and its local spread by introgression. Plant Cell 27:2401-2414.

Oka, H.I. 1988. Origin of cultivated rice. 254 p. Japan Scientific Societies, Tokyo, Japan/Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.

Oka, H.I., Morishima, H. 1982. Phylogenetic differentiation of cultivated rice. XXIII. Potentiality of wild progenitors to evolve the *indica* and *japonica* types of rice cultivars. Euphytica 31:41-50.

Olsen, K.M., Caicedo, A.L., Polato, N., et al. 2006. Selection under domestication: evidence for a sweep in the *waxy* genomic region. Genetics 173:975-983.

Olsen, K., Purugganan, M. 2002. Molecular evidence on the origin and evolution of glutinous rice. Genetics 162:941-950.

Ong, M.H., Blanshard, J.M.V. 1995.Texture determinant of cooked, parboiled rice. II: Physiochemical properties and leaching behavior of rice. J. Cereal Sci. 21:261-269.

Orijemie, E. 2018. The archaeology of the later Stone Age (LSA) in Nigeria: A review. p. 362-379. In Mercuri, A., D'Andrea, A.C., Fornaciari, R., et al. (eds.) Plant and people in the African past. Springer Nature, Cham, Switzerland.

Orjuela, J., Sabot, F., Chéron, S., et al. 2014. An extensive analysis of the African rice genetic diversity through a global genotyping. Theor. Appl. Genet. 127:2211-2223.

Pachauri, V., Singh, M., Singh, A., et al. 2010. Origin and genetic diversity of aromatic rice varieties, molecular breeding and chemical and genetic basis of rice aroma. J. Plant Biochem. Biotechnol. 19:127-143.

Pariasca-Tanaka, J., Chin, J., Dramé, K., et al. 2014. A novel allele of the P-starvation tolerance gene *OsPSTOL1* from African rice (*Oryza glaberrima* Steud) and its distribution in the genus *Oryza*. Theor. Appl. Genet. 127:1387-1398.

Pariasca-Tanaka, J., Lorieux, M., He, C., et al. 2015. Development of a SNP genotyping panel for detecting polymorphisms in *Oryza glaberrima*/*O. sativa* interspecific crosses. Euphytica 201:67-78.

Park, S., Choi, M., Lee, J., et al. 2016. Molecular and biochemical analysis of two rice flavonoid 3´-hydroxylases to evaluate their roles in flavonoid biosynthesis in rice grain. Int. Mol. Sci. 17:1549-1562.

Petrie, C., Bates, J. 2017. ´Multi-cropping', intercropping and adaptation to variable environments in Indus South Asia. J. World Prehist. 30:81-130.

Petrie, C., Bates, J., Higham, T., et al. 2016. Feeding ancient cities in South Asia: dating the adoption of rice, millet and tropical pulses in the Indus civilization. Antiquity 90:1489-1504.

Petrie, C., Singh, R., Bates, J., et al. 2017. Adaptation to variable environments, resilience to climate change. Investigating land, water and settlement in Indus northwest India. Curr. Anthropol. 58(1):1-30

Platten, J., Egdane, J., Ismail, A., et al., 2013. Salinity tolerance, Na+ exclusion and allele mining of HKT1; 5 in *Oryza sativa* and *Oryza glaberrima*: many sources, many genes, one mechanism? BMC Plant Biol. 13:32.

Pokharia, A., Sharma, S., Tripathi, D., et al. 2016. Neolithic-Early historic (2500-200 BC) plant use: the archaeobotany of Ganga Plain, India. Quat. Int. 443 (Part B):223-237.

Portères, R. 1962. Primary cradles of agriculture in the African continent. J. Afr. Hist. 3:195-210.

Portères, R. 1976. African cereals: Eleusine, fonio, black fonio, teff, *Brachiaria*, *Paspalum*, *Pinnesetum*, and African rice. p. 409-452. In Harlan, J., de Wet, J. (eds.) Origins of African plant domestication. Mouton, The Hague, The Netherlands.

Purugganan, M., Fuller, D. 2009. The nature of selection during plant domestication. Nature 457:843-848.

Purugganan, M., Fuller, D. 2011. Archaeological data reveals slow rates of evolution during plant domestication. Evolution 65:171-183.

Radanielina, T., Ramanantsoanirina, A., Raboin, L-M., et al. 2013. The original features of rice (*Oryza sativa* L.) genetic diversity and the importance of within-variety diversity in the highlands of Madagascar build a strong case for in situ conservation. Genet. Res. Crop Evol. 60:311-323.

Rakshit, S., Rakshi, A., Matsumara, H., et al. 2007. Large-scale DNA polymorphism study of *Oryza sativa* and *Oryza rufipogon* reveals the origin and divergence of Asian rice. Theor. Appl. Genet. 114:731-743.

Randhawa, M. 1962. Agriculture and animal husbandry in India. Indian Council for Agricultural Research, New Delhi, India.

Ray, A., Ray, R. 2018. The birth of *aus* agriculture in the southern-eastern highlands of India- an exploratory synthesis. Ancient Asia 9:1-7.

Rosen, A., Macphail, R., Liu, L., et al. 2017. Rising social complexity, agricultural intensification, and the earliest rice paddies on the Loess Plateau of northern China. Quat. Int. 437:50-59.

Roy, S., Banerjee, A., Mawkhlieng, B., et al. 2015. Genetic diversity and population structure in aromatic and quality rice (*Oryza sativa* L.) landraces from North-Eastern India. PLoS ONE 10(6):e0129607.

Ruddiman, W., Guo, X., Zhou, H., et al. 2008. Early rice farming and anomalous methane trends. Quat. Sci. Rev. 27:1291-1295.

Ruf, T. 1993. The history of agricultural development. p. 188-208. In Gaig, G. (ed.) The agriculture in Egypt. Centre for Agricultural Strategy, University of Reading. Oxford University Press, Oxford, UK.

Sagart, L., Hsu, T., Tsai, Y., et al. 2018. A northern Chinese origin of Austronesian agriculture: new evidence on traditional Farmosan cereals. Rice 11:57.

Saitoh, K., Onishi, K., Mikami, I., et al. 2004. Allelic diversification at the *C* (*OsC1*) locus of wild and cultivated rice: nucleotide changes associated with phenotypes. Genetics 168:997-1007.

Sakai, H., Ikawa, H., Tanaka, T., et al. 2011. Distinct evolutionary patterns of *Oryza glaberrima* deciphered by genome sequencing and comparative analysis. Plant J. Cell Mol. Biol. 66:796-805.

Sakamoto, W., Ohmori, T., Kageyama, K., et al. 2001. The Purple leaf (*Pl*) locus of rice: the *Plw* allele has a complex organization and includes two genes encoding basic helix-loop-helix proteins involved in anthocyanin biosynthesis. Plant Cell Physiol. 42:982-991.

Samyor, D., Baran, A., Chandra, S. 2017. Pigments rice a potential source of bioactive compounds: a review. Int. Food Sci. Technol. 52:1073-1081.

Sang, T., Ge, S. 2007a. Genetics and phylogenetics of rice domestication. Curr. Opin. Genet. Dev. 17:533-538.

Sang, T., Ge, S. 2007b. The puzzle of rice domestication. J. Integr. Plant Biol. 49:760-768.

Saraswat, K., Pokharia, A. 2003. Palaeoethnobotanical investigations at early Harappan Kunal. Pragdhara 13:105-140.

Sarkarung, S., Somrith, B., Chitrakorn, S. 2000. Aromatic rices of Thailand. p. 180-183. In Sing, R., Singh, U., Kush, G. (eds.) Aromatic rices. Oxford & IBH Publishing, New Delhi, India.

Sarla, N., Swamy, B. 2005. *Oryza glaberrima*: a source for the improvement of *Oryza sativa*. Curr. Sci. 89:955-963.

Sattaka, P. 2016. Geographical distribution of glutinous rice in the Greater Mekong Sub-region. J. Mekong Soc. 12:27-48.

Schatz, M., Maron, L., Stein, J., et al. 2014. Whole genome de novo assemblies of three divergent strains of rice, *Oryza sativa*, document novel gene space of *aus* and *indica*. Genome Biol. 15:506.

Schiller, J., Appa Rao, S., Inthapanya, P., et al. 2006. Glutinous rice in Laos. p. 197-214. In Schiller, J., Chanphengxay, M., Linquist, B., et al. (eds.) Rice in Laos. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Second, G. 1982. Origin of the genetic diversity of cultivated rice (*Oryza* spp.): study of the polymorphism scored at 40 isoenzyme loci. Jpn. J. Genet. 57:25-57.

Semon, M., Nielsen, R., Jones, M., et al. 2005. The population structure of African cultivated rice *Oryza glaberrima* (Steud.): Evidence for elevated levels of linkage disequilibrium caused by admixture with *O. sativa* and ecological adaptation. Genetics 169:1639-1647.

Shakiba, E., Eizenga, G. 2014. Unraveling the secrets of rice wild species p. 1-58. In Yan, W.; Bao, J. (eds.) Rice: Germplasm, genetics and improvement, IntechOpen. doi:10.5772/58393.

Shaw, J., Sutcliffe, J. 2003. Ancient dams, settlement archaeology and Buddhist propagation in Central India: the hydrological background. Hydrol. Sci. J. 48:277-291.

Shi, W., Yang, Y., Chen, S., et al. 2008. Discovery of a new fragrance allele and the development of functional markers for the breeding of fragrance rice varieties. Mol. Breed. 22:185-192.

Shih, C., Chu, H., Tang, L., et al. 2008. Functional characterization of key structural genes in rice flavonoid biosynthesis. Planta 228:1043-1054.

Si, L., Chen, J., Hiuang, X., et al. 2016. *OsSPL13* controls grain size in cultivated rice. Nat. Genet. 48:447-457.

Siddiq, E., Vemireddy, J., Nagaraju, J. 2012. Basmati rices: genetics, breeding and trade. Agric. Res. 1:25-36.

Sié, M., Sanni, K., Futakuchi, K., et al. 2012. Towards a rational use of African rice (*Oryza glaberrima* Steud.) for breeding in Sub-Saharan Africa. Genes, Genome Genomics 6 (Special Issue 1):1-7.

Sikirou, M., Shittu, A., Konaté, K., et al. 2018. Screening African rice (*Oryza glaberrima*) for tolerance to abiotic stresses: I. Fe toxicity. Field Crops Res. 220:3-9.

Silva, F., Stevens, C.J., Weisshopf, A., et al. 2015. Modeling the geographical origin of rice cultivation in Asia using the rice archeological database. PLoS ONE 10(9):e0137024.

Silva, F., Weisskopf, A., Castillo, C., et al. 2018. A tale of two rice varieties: Modeling the prehistoric dispersal of *japonica* and proto-*indica* rices. The Holocene 28(1):1-14.

Singh, S. 2014. Early centres of origin of agriculture in the Middle Ganga Plain. Am. Int. J. Res. Hum. Arts Social Sci. 6:247-251.

Singh, N., Singh, B., Rai, V., et al. 2017. Evolutionary insights based on SNP haplotypes of red pericarp, grain size and starch synthase genes in wild and cultivated rice. Front. Plant Sci. 8:972.

Singh, N., Wu, S., Raupp, W., et al. 2019. Efficient curation of genebanks using next generation sequencing reveals substantial duplication of germplasm accessions. Sci. Rep. 9:650.

Song, J., Wang, L., Fuller, D. 2019. A regional case in the development of agriculture and crop processing in northern China from the Neolithic to Bronze Age: archaeobotanical evidence from the Sushi River survey, Shanxi province. Archaeol. Anthropol. Sci. 11:667-682.

Stein, J., Yu, Y., Copetti, D., et al. 2018. Genomes of 13 domesticated and wild rice relatives highlight genetic conservation, turnover and innovation across the genus *Oryza*. Nat. Genet. 50:285-296.

Stevens, C., Fuller, D. 2017. The spread of agriculture in Eastern Asia: Archaeological bases for hypothetical farmers/language dispersal. Lang. Dynam. Change 7:152-186.

Stevens, C., Murphy C., Roberts, R., et al. 2016. Between China and South Asia: A middle Asian corridor of crop dispersal and agricultural innovation in the Bronze Age. The Holocene 26:1-15.

Sun, C., Wang, X., Yoshimura, A., et al. 2002. Genetic differentiation for nuclear, mitochondrial and chloroplast genomes in common wild rice (*Oryza rufipogon* Griff.) and cultivated rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 104:1335-1345.

Sun, X., Zhang, Z., Chen, C., et al. 2018. The *C-S-A* gene system regulates hull pigmentation and reveals evolution of anthocyanin biosynthesis pathway in rice. J. Exp. Bot. 69:1485-1498.

Sweeney, M., McCouch, S. 2007. The complex history of the domestication of rice. Ann. Bot. 100:951-957.

Sweeney, M., Thomson, M., Cho, Y., et al. 2007. Global dissemination of a single mutation conferring white pericarp in rice. PLoS Genet. 3:e133.

Sweeney, M., Thomson, M., Pfeil, B., et al. 2006. Caught red-handed: *Rc* encodes a basic helix-loop-helix protein conditioning red pericarp in rice. Plant Cell 18:283-294.

Szareski, V., Carvalho, I., da Rosa, T., et al. 2018. *Oryza* wild species: an alternative for rice breeding under abiotic stress conditions. Am. J. Plant Sci. 9:1093-1104.

Tan, L., Li, X., Sun, X., et al. 2008. Control of a key transition from prostrate to erect growth in rice domestication. Nat. Genet. 40:1360-1364.

Thakur, B., Saxena, A., Singh, I. 2018. Paddy cultivation during early Holocene: evidence from diatoms in Lahuradewa lake sediments, Ganga Plain. Curr. Sci. 114:2106-2115.

Thomas, G., Joseph, L., Varghese, G., et al. 2001. Discrimination between *Oryza malampuzhaensis* Krish et Chand and *Oryza officinalis* Wall ex Watt based on RAPD markers and morphology traits. Euphytica 122:181-189.

Tiwari, R., Srivastava, R., Saraswat, K., et al. 2008. Early farming at Lahuradewa. Pragdhara 18:347-373.

Tong, W., Kim, T., Park, Y. 2016. Rice chloroplast genome variation architecture and phylogenetic dissection in diverse *Oryza* species assessed by whole-genome resequencing. Rice 9:57.

Travis, A.J., Norton, G.J., Datta, S., et al. 2015. Assessing the genetic diversity of rice originating from Bangladesh, Assam and West Bengal. Rice 8:35.

Tsang, C. 2005. Recent discoveries at the Tapenkeng culture sites in Taiwan: implications for the problem of Austronesian origins. p. 63-73. In Blench, R., Sagart, L., Sanchez-Mazas, A. (eds.) The peopling of East Asia: putting together archaeology, linguistics and genetics. Routledge, London, UK.

Van Andel, T. 2010. African rice (*Oryza glaberrima* Steud.): Lost crop of the enslaved African discovered in Suriname. Econ. Bot. 64:1-10.

Van Andel, T., Meyer, R., Aflitos, S., et al. 2016. Tracing ancestor rice of Suriname Maroons back to its African origins. Nat. Plants 2:16149.

Van der Veen, M. 2011. Consumption, trade and innovation: exploring the botanical remains from the Roman and Islamic ports at Quseir-al-Qadim, Egypt. J. Afric. Archaeol. Monograph series 6. Frankfurt, Africa Magna Verlag, Germany.

Vaughan, D. 1994. The wild relatives of rice: a genetic resources handbook. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Vaughan, D., Lu, B., Tomooka, N. 2008a. Was Asian rice (*Oryza sativa*) domesticated more than once? Rice 1:16-24.

Vaughan, D., Lu, B., Tomooka, N. 2008b. The evolving story of rice evolution. Plant Sci. 174:394-408.

Vaughan, D., Morishima, H. 2003. Biosystematics of the genus *Oryza*. p. 27-65. In Smith, C.W., Dilday, R.H. (eds.) Origin, history, technology and production. John Willey & Son, Hoboken, New York, USA.

Vaughan, D., Morishima, H., Kadowaki, K. 2003. Diversity in the *Oryza* genus. Curr. Opin. Plant Biol. 6:139-146.

Veltman, M., Flowers, J., van Andel, T., et al. 2019. Origins and geographical diversification of African rice (*Oryza glaberrima*). PLoS ONE 14(3):e0203508.

Vincent, H., Wiersema, J., Kell, S., et al. 2013. A prioritized crop wild relative inventory to help underpin global food securuty. Biol. Conser. 157:265-275.

Villareal, C., Juliano, O., Hizukuri, S. 1993. Varietal differences in amylopectin staling of cooked waxy milled rices. Cereal Chem. 70:753-758.

Vitte, C., Ishii, T., Lamy, F., et al. 2004. Genomic paleontology provides evidence for two distinct origins of Asian rice (*Oryza sativa* L.) Mol. Genet. Genomics 272:504-511.

Voss-Fels, K., Stahl, A., Hickey, L. 2019. Q&A: modern crop breeding for future food security. BMC Biol. 17:18.

Walshaw, S. 2010. Converting to rice: Urbanization, islamization and crops on Pemba Island, Tanzania, AD 700-1500. World Archaeol. 42:137-154.

Wambugu, P., Brozynska, M., Furtado, A., et al. 2015. Relationships of wild and domesticated rice (*Oryza* AA genome species) based upon whole chloroplast genome sequence. Sci. Rep. 5:13957.

Wambugu, P., Furtado, A., Waters, D., et al. 2013. Conservation and utilization of African *Oryza* genetic resources. Rice 6:29.

Wambugu, P., Ndjiondjop, M., Furtado, A., et al. 2018. Sequencing of bulks of segregants allows dissection of the genetic control of amylose content in rice. Plant Biotechnol. 16:100-110.

Wang, C., Lu, H., Gu, W., et al. 2017. Temporal changes of mixed millet and rice agriculture in Neolithic-Bronze Age Central Plain, China. Archaeobotanical evidence from Zhuzhai site. The Holocene 24:738-754.

Wang, W., Mauleon, R., Hu, Z., et al. 2018a. Genomic variation in 3,010 diverse accessions of Asian cultivated rice. Nature 557:43-49.

Wang, Z., Second, G., Tanksley, S.D. 1992. Polymorphism and phylogenetic relationships among species in the genus *Oryza* as determined by analysis of nuclear RFLPs. Theor. Appl. Genet. 83:565-581.

Wang, G., Shu, Q. 2007. Fine mapping and candidate gene analysis of purple pericarp gene *Pb* in rice (*Oryza sativa* L.). Chinese Sci. Bull. 52:3097-3104.

Wang, H., Viera, F., Crawford, J., et al. 2018b. Asian wild rice is a hybrid swarm with extensive gene flow and feralization from domesticated rice. Genome Res. 27:1029-1038.

Wang, M., Yu, Y., Haberer, G., et al. 2014a. The genome sequence of African rice (*Oryza glaberrima*) and evidence for independent domestication. Nat. Genet. 46:982-988.

Wang, C., Zheng, X., Xu, Q., et al. 2014b. Genetic diversity and classification of *Oryza sativa* with emphasis on Chinese rice germplasm. Heredity 112:489-496.

Wang, M., Zhu, Z., Tan, L., et al. 2013. Complexity of *indica-japonica* varietal differentiation in Bangladesh rice landraces revealed by microsatellites markers. Breed. Sci. 63:227-232.

Wei, X., Xu, J., Guo, H., et al. 2010. *DTH8* suppresses flowering in rice, influencing plant height and yield potential simultaneously. Plant Physiol. 153:1747-1758.

Weisskopf, A. 2017. A wet and dry story: distinguishing rice and millet arable system using phytoliths. Veg. Hist. Archaeobot. 26:99-109.

Weisskopf, A., Deng, Z., Qin, L., et al. 2015. The interplay of millets and rice in the Neolithic central China: Integrating phytoloths into the archaeobotany of Baligang. Archaeol. Res. Asia 4:36-45.

Weisskopf, A., Harvey, E., Kingwell-Banham, E., et al. 2014. Archaeological implications of phytolith assemblages from cultivated rice systems, wild rice stands and macro-regional patterns. J. Archeol. Sci. 51:43-53.

Win, K., Yamagata, Y., Doi, K., et al. 2017. A single base change explains the independent origin of and selection for the nonshattering gene in African rice domestication. New Phytol. 213:1925-1935.

Wu, W., Liu, X., Wang, M., et al., 2017. A single-nucleotide polymorphism causes smaller grain size and loss of see shattering during African rice domestication. Nat. Plants 3:17064.

Wu, X., Zhang, C., Goldberg, P., et al. 2012. Early pottery al 20,000 years ago in Xianrendong Cave, China. Science 336:1696-1700.

Wu, Y., Zhao, S., Li, X., et al. 2018. Deletions linked to *PROG1* gene participate in plant architecture domestication in Asia and African rice. Nat. Commun. 9:4157.

Wu, W., Zheng, X., Lu, G., et al. 2013. Association of functional nucleotide polymorphism at *DTH2* with the northward expansion of rice cultivation in Asia. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 110:2775-2780.

Xie, Y., Shen, R., Chen, L., et al. 2019. Molecular mechanisms of hybrid sterility in rice. Sci. China Life Sci. 62:737-743.

Xu, X., Liu, X., Ge, S., et al. 2012. Resequencing 50 accessions of cultivated and wild rice yields markers for identifying agronomically important genes. Nature Biotechnol. 30:105-111.

Xu, T., Sun, J., Chang, H., et al. 2017. QTL mapping for anthocyanin and proanthocyanidin content in red rice. Euphytica 213:243

Xu, J., Tsuchimoto, S., Ohtsubo, H., et al. 2007. Phylogenetic analysis of *Oryza rufipogon* and their relations to *Oryza sativa* strains by insertion polymorphism of rice SINEs. Genes Genet. Syst. 82:217-229.

Xu, K., Xu, X., Fukao, T., et al. 2006. *Sub 1A* is an ethylene-response-factor-like gene that confers submergence to rice. Nature442:705-708.

Xue, W., Xing, Y., Weng, X., et al. 2008. Natural variation in *Ghd7* is an important regulator of heading date and yield potential in rice. Nat. Genet. 40:761-767.

Yamanaka, S., Nakamura, I., Watanabe, K., et al. 2004. Identification of SNPs in the *waxy* gene among glutinous rice cultivars and their evolutionary significance during the domestication process of rice. Theor. Appl. Genet. 108:1200-1204.

Yang, X., Barton, Z., Wan, Q., et al. 2013. Sago-type palms were an important plant food prior to rice in southern subtropical China. PLoS ONE 8(5):e63148.

Yang, X., Chen, Q., Ma, Y., et al. 2018a. New radiocarbon and archaeobotanical evidence reveal the timing and route of southward dispersal of rice farming in south China. Chin. Sci. Bull. 63:1495-1501.

Yang, X., Fuller, D., Huan, X., et al. 2015. Barnyard grasses were processed with rice around 10000 years ago. Sci. Rep. 5:16251.

Yang, C-C., Kawahara, Y., Mizuno, H., et al. 2012a. Independent domestication of Asian Rice followed by gene flow from *japonica* to *indica*. Mol. Biol. Evol. 29:1471-1479.

Yang, X., Wang, W., Zhuang, Y., et al. 2016. New radiocarbon evidence on early rice consumption and farming in South China. The Holocene 27(7):1-7.

Yang, X., Xia, X., Zeng, Y., et al. 2018b. Identification of candidate genes for gelatinization temperature, gel consistency and pericarp color by GWAS in rice based on SLAF-sequencing. PLoS Genet. 13:e0196690.

Yang, J., Zhao, X., Cheng, K., et al. 2012b. A killer-protector system regulates both hybrid sterility and segregation distortion in rice. Science 337:1336-1340.

Zhang, M., Guo, B., Zhang, R., et al. 2006. Separation, purification and identification of antioxidant composition in black rice. Agric. Sci. China 5:431-440.

Zhang, C., Hung, H-C. 2008. The Neolithic of southern China-origin, development, and dispersal. Asian Perspect. 47:299-329.

Zhang, C., Hung, H-C. 2010. The emergence of agriculture in southern China. Antiquity 84:11-25.

Zhang, C., Hung, H-C. 2012. Later hunter-gathers in southern China, 18000-3000 BC. Antiquity 86:11-29.

Zhang, C., Hung, H-C. 2013a. Jiauhu 1: earliest farmers beyond the Yangtze river. Antiquity 87:46-63.

Zhang, C., Hung, H-C. 2013b. East Asia: Archaeology. p. 209-216. In Ness, I., Bellwood, P. (eds.) Encyclopedia of Human Migration. Vol. 1. Prehistory. Willey-Blackwell, New York, USA.

Zhang, J., Lu, H., Gu, W., et al. 2012b. Early mixed faming of millet and rice 7800 years ago in the Middle Yellow River region, China. PLoS ONE 7(12):e52146.

Zhang, J., Lu, H., Wu, N et al. 2010. Phytolith evidence for rice cultivation and spread in Mid-Late Neolithic archaeological sites in Central North China. Boreas 39:592-602.

Zhang, D., Wang, M., Qi, Y., et al. 2012a. Genetic structure and eco-geographical differentiation of cultivated Keg rice (*Oryza sativa* L. subsp. *japonica*) in China revealed by microsatellites. J. Integr. Agr. 11:1755-1766.

Zhang, Q., Zhu, T., Xia, E., et al. 2014. Rapid diversification of five *Oryza* AA genomes associated with rice adaptation. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 111:E4954-E4962.

Zhao, Z. 1998. The middle Yangtze region in China is one place where rice was domesticated: phytolith evidence from the Diaotonghuan cave, northern Jiangxi. Antiquity 278:885-897.

Zhao, Z. 2010. New data and new issues for the study of origin of rice agriculture in China. Archaeol. Anthropol. Sci. 2:99-105.

Zhao, Z. 2011. New archaeobotanic data for the study of the origins of agriculture in China. Curr. Anthropol. 52:S295-S306.

Zhao, Z., Piperno, D.R. 2000. Late Pleistocene/Holocene environments in the middle Yangtze River valley, China and rice (*Oryza sativa* L.) domestication: the phytolith evidence. Geoarchaeology 15:203-222.

Zhao, K., Tung, C-W., Eizenga, G., et al. 2011. Genome-wide association mapping reveals a rich genetic architecture of complex traits in *Oryza sativa*. Nat. Commun. 2:467.

Zheng, Y., Crawford, G., Jiang, L., et al. 2016. Rice domestication revealed by reduced shattering of archaeological rice from the lower Yangtze valley. Sci. Rep. 6:28136.

Zhou, X., Li, X., Zhao, K., et al. 2011. Early agricultural development and environmental effects in the Neolithic Longdong basin (Eastern Gansu). Chin. Sci. Bull. 56:762-771.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., et al. 2002. Aging of stored rice: Changes in chemical and physical attributes. J. Cereal Sci. 35:65-78.

Zhou, H., Xie, Z., Ge, S. 2003. Microsatellites analysis of genetic diversity and population genetic structure of a wild rice (*O. rufipogon* Griff.) in China. Theor. Appl. Genet. 107:332-339.

Zhu, Q., Ge, S. 2005. Phylogenetic relationships among A-genome species of the genus *Oryza* revealed by intron sequence of four nuclear genes. New Phytol. 167:249-265.

Zhu, Q., Zheng, X., Luo, J., et al. 2007. Multilocus analysis of nucleotide variation of *Oryza sativa* and its wild relatives. Severe bottleneck during domestication of rice. Mol. Biol. Evol. 24:857-888.

Zong, Y., Chen, Z., Innes, J., et al. 2007. Fire and flood managements of coastal swamp enable first rice paddy cultivations in east China. Nature 449:459-462.

Zuo, X., Lu, H., Jiang, L., et al. 2017. Dating rice remain through phytolith carbon-14 study reveals domestication at the beginning of the Holocene. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 14:6486-6491.

Capítulo 2. Diseminación del cultivo del arroz desde su centro de origen al mundo

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Paul Gepts, Gabriel Donoso Ñ.

Diseminación desde China hacia otros países de Asia del Este

En tiempos prehistóricos, el noreste de Asia, que comprende a la península de Corea, el archipiélago de Japón y el sur del lejano oriente de Rusia, tuvo una agricultura basada en mijo, trigo y arroz (Miyamoto, 2014).

Corea. El período de introducción del arroz a Corea se sitúa entre los años 3.000 y 2.000 a. C. en la parte central-oeste y sureste, respectivamente (Crawford y Lee, 2003; Norton, 2007), aunque el cultivo estaba ampliamente difundido en la península entre el 2.300 y 2.100 a. C. (Nesbitt, 2010), o en la Edad del Bronce (1.500-300 a. C.) (Ahn, 2010; Lee, 2011; Kim, 2015; Miyamoto, 2014; 2016; 2019).

Al respecto, algunos autores plantean que la introducción del arroz y otras especies alimenticias ocurrió en dos períodos. La primera habría ocurrido a finales del período Chulmun (Kim, 2014), en un contexto de una sociedad dedicada, principalmente, a la caza, colecta de plantas silvestres y pesca (Crawford y Chen, 1998; Choy y Richards, 2010), donde la población continuó dependiendo de la colecta de plantas silvestres y de la caza de animales, por lo cual el arroz no jugó un papel importante en la alimentación de estas comunidades (Lee, 2011).

La segunda introducción habría ocurrido durante la cultura Mumun (1.500 a 300 a. C.), equivalente a la Edad del Bronce, en un contexto de un cambio gradual en las estrategias de subsistencia de las comunidades, desde colectores, cazadores y pescadores a agricultores (Nelson, 1982; Choe y Bale, 2002; Ahn, 2010; Bale, 2011; Lee, 2011). A ello se suma la aparición de otros cultivos como cebada y soya, herramientas de piedra (Crawford et al., 2006; Ahn, 2010; Lee, 2011), los primeros sistemas de preparación de suelo y manejo de agua (Bale, 2011; Lee et al., 2014). Dada esta situación, el cultivo del arroz se diseminó por toda la península, con excepción de la zona noreste, donde las condiciones climáticas y de suelo no eran las adecuadas (Ahn, 2010).

En este contexto, un estudio sobre el consumo del arroz en Corea señaló que, en los inicios de la Edad del Bronce, el cultivo del arroz era de libre acceso a toda la comunidad. Sin embargo, en la medida que comenzó la estratificación de la población y la aparición de las diferentes clases sociales, el arroz pasó a ser un alimento lujoso, restringido y controlado directa o indirectamente por los gobiernos centrales (Kim, 2015). Esta connotación socio-cultural elitista fue advertida, también, en un estudio realizado fuera de la península, en la isla Jejedo, durante el período Mumun (180 a.C.-d. C. 50), en un contexto agroecológico no apto para el desarrollo del cultivo (Kim et al., 2018).

En sus inicios, el cultivo del arroz fue de secano (Ahn, 2010), aunque durante los siglos VII a IV a. C. el riego se empezó a practicar en la parte central y sur de la península. En este sentido, la zona central suroccidental adquirió una gran importancia en comparación a la zona oriental, donde se continuó desarrollando el cultivo de secano (Norton, 2007; Kim, 2014).

El grano de arroz sembrado en el período (1.500 a. C.) era del tipo *japonica* templado, de tamaño muy corto y angosto (Shim, 1991; Kim et al., 2014) que se fue alargando con posterioridad (Ahn, 2010). Las razones de esta evolución en el tamaño del grano no están claras, pero pudo ser una respuesta a las preferencias de la población por un tamaño de grano más grandes o la aparición de una mutación que afectó el tamaño del grano y que fue posteriormente seleccionada y diseminada en el país y en la región (Kim et al., 2013). Este cambio de tamaño fue confirmado genéti-

camente por la presencia de dos tipos de arroz: *japonica* tropical y *japonica* templado en el norte de Japón, durante el período Yayoi y Heian que representan diferentes tamaños de grano (Tanaka et al., 2010).

En relación a la ruta de introducción del arroz desde China a Corea (Figura 1) existen varias hipótesis, donde las condiciones climáticas habrían sido uno de los factores determinantes de la diseminación de la agricultura en el noreste de Asia (Park et al., 2019). La primera hipótesis plantea la ruta del sur que implica la introducción del arroz a la península de Corea desde el sureste de Asia o de las regiones de la costa del sur de China. La segunda hipótesis plantea una ruta a través del río Amarillo y la región de la Cuenca del río Yangtze; y la tercera hipótesis la ruta norte desde la región baja del río Yangtze, vía penínsulas de Shandong y Liaodong a través de la costa del río Amarillo, hacia Corea. Aparentemente, esta última hipótesis tiene un mayor apoyo desde el punto de vista arqueológico y cultural (Kim, 1982; Choe, 1982; Nesbitt, 2010; Ahn, 2010; Bale, 2011).

Japón. Los primeros cultivos de arroz y mijo fueron introducidos a Japón a mediados del período Yayoi (Kagawa, 1973) o entre finales del período Jomon y los inicios del Yayoi (2.500 a 3.000 a. C.) (D´Andrea et al., 1995; Crawford, 2011). Aparentemente, los primeros arroces detectados a finales del período Jomon, en el norte de Kyushu, eran del tipo *japonica* tropical y cultivados en suelos de secano. Sin embargo, este tipo de arroz era diferente al encontrado a inicios del período Yayoi, que era posiblemente *japonica* templado y se cultivaba bajo condiciones de riego entre 2.000 y 1.000 a. C. (Fuller et al., 2011). Esta situación fue confirmada por un estudio genético de muestras de arroz del período Yayoi que identificó la presencia de arroz *japonica* templado y *japonica* tropical. Así se infiere que la presencia inicial de variedades *japonica* tropical fueron reemplazadas por variedades del tipo *japonica* templada, debido a los cambios climáticos ocurridos en aquella época, a su mejor adaptación y a las preferencias culinarias de la población (Tanaka et al., 2010). Otro estudio genético de muestras de arroz del período Yayoi (2.000 a. C.), colectadas en Japón y Corea, detectó también la presencia de arroz tipo *indica* y *japonica* en la zona (Kumagai et al., 2016).

En relación a la introducción del arroz a Japón (Figura 1), se plantean tres posibles rutas: 1) La ruta sur o del océano plantea la introducción del arroz desde la parte sur de China, al sur de Kyushu, a través de las Islas Ryukye (Okinawa), desde donde el arroz tipo *japonica* tropical (=*javanica*) se habría diseminado al resto del territorio de Japón (Crawford, 2011); 2) La ruta del norte desde Changjiang, al norte de Kyushu vía la República de Corea y el estrecho coreano Tsushima (Kagawa, 1973; Nesbitt, 2010). Esta ruta incluye dos vías posibles, la primera conformada por migrantes de la cuenca del río Namgang del sur de la península de Corea que habrían llegado a las planicies de Karatsu e Itoshima, en el norte de Kyushu, alrededor del siglo IX y VIII a. C., llevando arroz *japonica* tropical. La segunda migración, integrada por pobladores de la Cuenca del río Nakdonggang, que habrían llegado a la llanura de Fukuoka con el arroz *japonica* templado, alrededor de los siglos VII y VI a. C. (Miyamoto, 2019); 3) La ruta de la península de Shandong hacia Corea y luego a Japón, o a través de las áreas costeras del bajo Yangtze/Shandong directo hacia Japón (Fuller et al., 2010), o desde la parte oriental de la provincia de Liaoning (Zhang y Hung, 2013).

La difusión del arroz, desde el suroeste de China a Japón, tomó aproximadamente 4.000 a 5.000 años. Sin embargo, una vez establecido en el norte de Kyushu (2.300 a. C.), al arroz le tomó alrededor de 1.000 años más para llegar al norte de Japón, Honshu, donde existía un clima templado frío que poseía una temperatura media de 11 a 12 °C (Takahashi, 1980).

Los primeros intentos de cultivar arroz en la región sur de Hokkaido se realizaron alrededor del año 1600, con malos resultados. No obstante, después de la guerra civil de 1869, muchos habitantes emigraron a Hokkaido para rehacer sus vidas e insistieron en establecer el cultivo del arroz en la zona (Takahashi, 1980), lo que se logró en 1850, en la ciudad de Ono. Las condiciones del norte de Japón, de día largo y bajas temperaturas, fueron un constante desafío para el crecimiento de la planta y la producción de arroz (Fujino et al., 2019b), lo que llevó a los programas de mejoramiento a concentrar sus esfuerzos en la selección de material genético precoz, tolerante a bajas temperaturas y de alta calidad (Shinada et al., 2014).

Los primeros cultivos de arroz en Hokkaido se realizaron con variedades cultivadas en la región límite norte de aquella época, como ´Honshu` y ´Tohoku`. Esta base genética permitió iniciar el programa de selección del germoplasma más adecuado para esta nueva zona. Para apoyar este trabajo, en el año 1893 se estableció en las afueras de Sapporo un lugar para evaluar variedades. Durante los años 1919 y 1927 se establecieron las bases para el desarrollo de un programa de mejoramiento genético de arroz, del cual se liberaron las variedades ´Akage`, ´Bozu`, ´Sakigake` y las primeras variedades precoces ´Hashiri-bozu` y ´Norín-11` (Takahashi, 1980). Producto de este trabajo de mejoramiento genético, el cultivo de arroz se ha expandido incluso más al norte de Hokkaido. Es así como en el año 1927, el cultivo del arroz se estableció en Enbetsu, límite norte del cultivo de arroz en el mundo (Fujino et al., 2019a), lo que implicó un cambio importante en las características fenotípicas y genéticas de la planta (Fujino et al., 2015; 2017; 2019a; 2019b; 2019c).

Las variedades modernas de arroz de Japón son clasificadas como *japonica* templada y sólo unas pocas variedades son clasificadas como *japonica* tropical, las que se siembran en suelos bajos del suroeste de Japón (Tanaka et al., 2010). El cambio del sistema de cultivo de arroz de secano al de riego trajo un profundo cambio en la estructura social, cultural y económica de Japón (Takamiya, 2001).

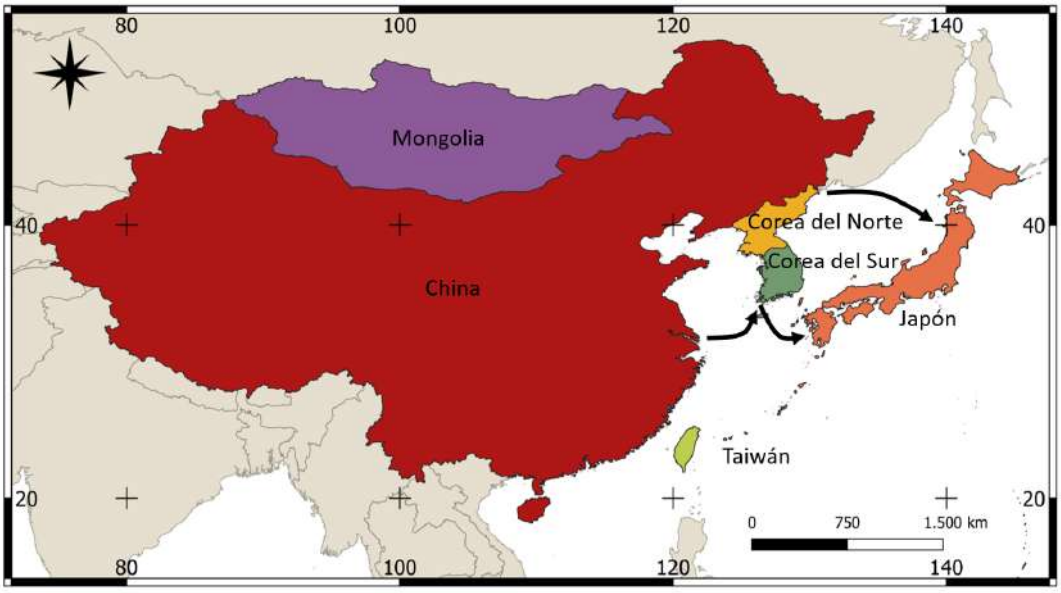


Figura 1. Posibles rutas de diseminación del arroz a Corea y Japón (Adaptado de Lee, 20017; Miyamoto, 2019).

Diseminación del arroz hacia la Federación Rusa

Federación Rusa. En sus comienzos el cultivo de arroz tuvo una escasa importancia y estuvo relegado a los oasis de Asia Central. Posteriormente, con el aumento del poder del Imperio Ruso en la zona (1860 a 1985), el cultivo empezó a adquirir una mayor importancia (Nesbitt, 2010). En esta zona árida y semi-árida, la siembra del arroz se realiza bajo condiciones de riego. La producción de arroz en esta zona está ubicada entre los 44° y 49° de latitud norte, límite para la producción de arroz. Las variedades cultivadas son del tipo *japonica* templada, precoces y tolerantes al frío (Tinsley, 1995).

La producción de arroz en la Federación Rusa está concentrada (Figura 2) en tres distritos federales: Lejano Oriente (región de Primorsky), del sur (región de Krasnodar y de Rostov), y del norte del Caúcaso (República de Dagestan, Adygea, Kalmykia, región de Astrakhan, y República Chechena) (Mikhailovna, 2014; Sukhomirov, 2018).

La introducción del arroz en el Lejano Oriente permitió que se cultivara el arroz hasta los 49° latitud norte. El éxito de esta experiencia incentivó la realización de siembras en otras regiones, utilizando las variedades precoces de Japón, como la región del noreste y a lo largo de los suelos cercanos a los ríos Kuban y Terek (Cáucaso), Don, en la desembocadura del Volga, así como en lugares aún más al norte, moviendo la frontera del cultivo del arroz a regiones más frías hasta los 50° latitud norte, como Olobe, KonTari, y Sakiguaké, entre otros (Brjezitsky, 1928; 1933).

En este escenario, los refugiados y deportados jugaron un rol importante en el desarrollo del cultivo del arroz. Después de la rebelión musulmana en Kashgaria en 1870, varios miles de chinos musulmanes, llamados ´Dungans`, llegaron a la Rusia Central Asiática y se establecieron en las regiones de Osh, Przhevalsky y Tokmak, donde comenzaron a realizar siembras de arroz (Nesbitt, 2010).

En la zona del Lejano Oriente de la entonces Unión de Repúblicas Soviéticas, las primeras siembras de arroz fueron realizadas por los inmigrantes coreanos entre 1908 y 1913 (Kho, 1987) o en 1918 (Brjezitsky, 1928) en el valle del río Yangchihe. Desde esta zona, el cultivo del arroz se diseminó a otras localidades como Suchan, Nicholsk, Ussurisk y Spassky (Son, 2013). Durante el período pre-revolucionario en el Lejano Oriente de Rusia, el cultivo de arroz no fue estimulado por las autoridades regionales, debido a que el desarrollo económico y social de esta zona dependía, en gran parte, de su relación comercial con Japón y China, importantes productores e importadores de arroz (Son, 2013). Por otro lado, cuando se estableció el régimen soviético, alrededor de 1920, las autoridades tampoco se interesaron por el cultivo del arroz y favorecieron la producción de otros cultivos, como el algodón, como una manera de intensificar la agricultura (Nesbitt, 2010).

Entre 1913 y 1924 la población coreana estuvo involucrada, también, en la construcción del sistema de riego que contribuyó a aumentar la superficie sembrada, trabajo apoyado por las tropas japonesas presentes en la región (Primorye y Amur). La nueva infraestructura de riego favoreció la mayor superficie sembrada y la producción. Es así como la superficie sembrada aumentó rápidamente, desde 1.300 ha de arroz en el año 1924 a 17.855 ha en 1929 (Son, 2013). En aquellos momentos, el cultivo del arroz estaba distribuido en los distritos de Vladivostok (93), Khabarovsk (5,5 %) y Amur (1,5 %) (Sukhomirov, 2018).

La semilla utilizada por los coreanos provenía de China, Japón y Corea (Son, 2013), y estaba compuesta por una mezcla de varios tipos de plantas (Brjezitsky, 1928). El sistema de siembra utilizado contemplaba la siembra en mayo y junio con semilla pregerminada, en suelos ligeramente inundados, y con una dosis de 100 a 115 kg ha^{-1}. Después de la siembra, el nivel del agua se mantenía en una altura de 10 a 15 cm, la que iba aumentando a medida que crecía la planta, hasta alcanzar los 25 a 35 cm. Las malezas más comunes eran *E. crus-galli* y *Alisma plantago*, las que se arrancaban a mano antes de la cosecha. La cosecha se realizaba en forma manual, utilizando una echona. Las plantas cosechadas eran reunidas en gavillas, las que se secaban al sol y se trillaban con animales (Brjezitsky, 1928).

Dado los buenos resultados técnicos y económicos del cultivo en la zona, el arroz fue incorporado al programa de investigación agrícola de la Estación Regional de Primorsky en el año 1926. Como una manera de continuar el apoyo al cultivo, en 1929 se preparó un plan de desarrollo a cinco años que consideraba la construcción de nuevos sistemas de regadíos, la incorporación de nuevos suelos regados y el inicio de la colectivización de las granjas, con la participación de coreanos y soviéticos (Son, 2013; Sukhomirov, 2018). Entre los años 1927 y1928, se inició un programa masivo de selección individual de plantas de la población (variedad) ´Kenzo` la que dio origen a las primeras variedades de arroz barbadas y sin barbas de la región. Entre 1929 y 1930, se inició una nueva etapa en el programa de mejoramiento, cuyo objetivo era obtener variedades precoces, de alto rendimiento, resistentes a *Pyricularia* spp., basada en la selección de poblaciones locales e introducidas. En la década de 1930 se empezaron a utilizar cruzamientos y a partir desde

1960 se empezaron a usar métodos modernos de selección para el desarrollo de las nuevas variedades (Zelensky, 2016).

El mejoramiento genético en el Distrito Federal Cáucaso Norte, región Don, empezó en 1926, en la Estación Piloto de Recuperación de Suelos, con el desarrollo de variedades precoces, de alto rendimiento, tolerantes a altas y bajas temperaturas, aunque sin mayor éxito. A partir de 1957, el mejoramiento genético y la producción de semilla tuvieron un nuevo impulso y se empezaron a desarrollar en la estación de mejoramiento de plantas de Zernogradskaya (´Don Breeding Center`), actualmente ´All-Russian Research Institute of Grain Crops` (Zelensky, 2016).

El mejoramiento genético de arroz en el Distrito Federal Sur, territorio de Krasnodar (Kuban), empezó en 1931, en la Estación Experimental del arroz Azov, la que fue reorganizada en varias oportunidades, para finalmente integrarse al All-Russian Rice Research Institute (ARRRI), en el año 1966. Éste reunía los esfuerzos de los científicos de Rusia, Ucrania, Uzbekistán y Kazajistán con nuevas infraestructuras, equipos, maquinarias y personal. En esta región, el primer trabajo de mejoramiento se empezó a realizar el año 1932 y estuvo dedicado al estudio de una colección de 1.509 accesiones, colectadas por N.I. Vavilov, de las cuales se desarrollaron diferentes variedades. La primera variedad comercial en la región fue ´Kenzo`, selección de una población traída del Lejano Oriente. Esta variedad fue cultivada por más de 20 años y fue progenitor de más de 20 nuevas variedades. Los primeros resultados del ARRRI fue el desarrollo de variedades modernas que se caracterizaban por poseer un alto rendimiento, resistencia a la tendedura y respuesta a la fertilización (Zelensky, 2016).

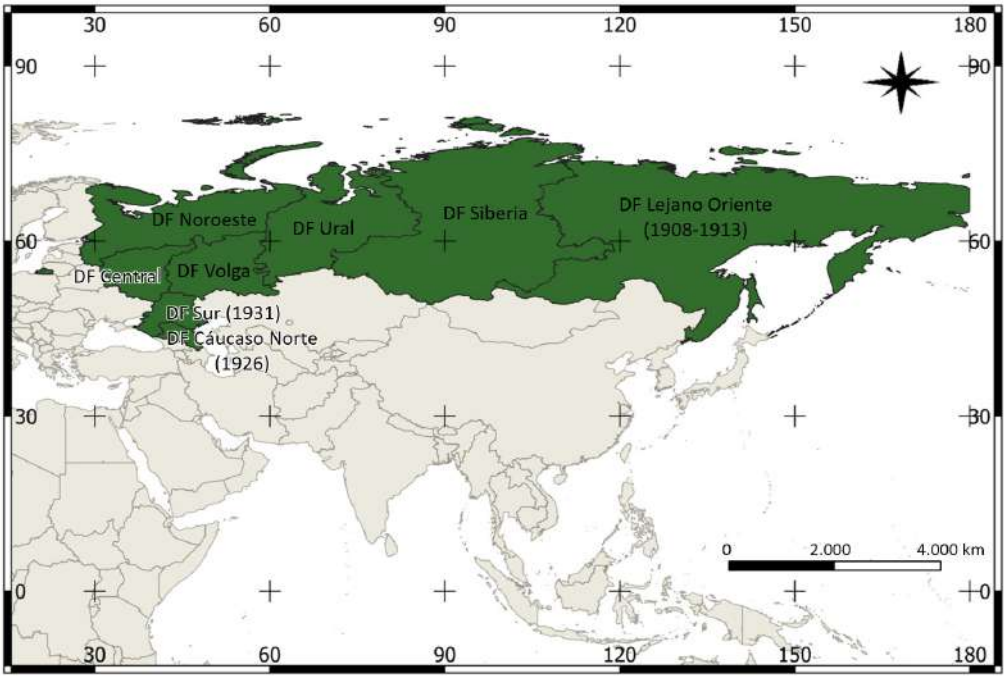


Figura 2. Primeras siembras de arroz en Asia del Norte.

Asia Central

El análisis de restos arqueológicos de partes de semilla de arroz (fitolitos) provenientes de Tuzusai, sur de Kazajistán, indican que el cultivo del arroz se habría llevado a cabo en esta zona a finales de la Edad del Hierro (300 a. C.) (Rosen et al., 2000).

Entre los principales responsables de la producción de arroz en Asia Central se menciona a la migración de poblaciones chino musulmanas que llegaron al Turquestán ruso, después de firmar el tratado Sino-Ruso en 1881, las que una vez establecidas en la parte norte de Kirguistán, formaron granjas con siembra de cereales, entre los cuales estaba el arroz (Kho, 1987). En 1928, se unió la migración de familias coreanas, desde la región marítima al sur de Rusia a la ciudad de Kzyl-Orda, hoy día Kazajistán, donde formaron las primeras granjas de producción de arroz ´Khazriz` e ´International`, por lo cual Kzyl-Orda recibe el nombre de la ´capital arrocera` en Kazajistán (Kho, 1987).

A finales de 1920, los campos de arroz en Turquestán se encontraban distribuidos, principalmente, en las cercanías de los afluentes del río Syr-Daria y, en menor proporción, en suelos altos (Figura 3). Los principales tipos de arroz utilizados en la zona era ´Arpa-Chaly`, ´Ak-Chaly` y ´American-Chaly` y en mayor proporción el arroz negro tipo ´Cara-Chaly`. La siembra se realizaba desde fines de abril a mediados de mayo, en un sistema inundado con semilla pre-germinada y en dosis de 72 a 96 kg ha^{-1}, sin fertilización y con un escaso control de malezas. En los suelos bajos no se realizaba ninguna rotación de cultivos. Sin embargo, en suelos altos el arroz se sembraba en rotación con cebada, algodón y calabazas (Brjezitsky, 1928).

En la zona Transcaucasia, el cultivo del arroz estaba ubicado, principalmente, en Azerbaiyán, Armenia y Ajaristan (Figura 3). En Azerbaiyán, el mayor desarrollo del cultivo se alcanzó en el distrito de Lenkoran, cuyo sistema de cultivo fue introducido desde Persia. Éste utilizaba almácigo y trasplante, donde se usaban plántulas de 14 a 18 cm de altura que eran plantadas a una distancia de 10 a 14 cm unas de otras y con tres a cuatro plantas por hoyo de plantación. La cosecha era manual, utilizando echonas, y las plantas cosechadas eran amarradas en gavillas que secaban al sol. La trilla se realizaba mediante el pisoteo de las plantas por los animales (Brjezitsky, 1928).

Desde 1937 a 1939, la política stalinista deportó alrededor de 170.000 coreanos a Kazajistán, Kirguistán y Uzbekistán (Figura 3). Los coreanos deportados formaron granjas colectivas en lugares deshabitados y otros se integraron a las granjas existentes, participando activamente en la construcción de sistemas de riego que contribuyeron a aumentar la producción de arroz en Asia Central. De esta manera, el arroz se convirtió en un cultivo importante para esta zona, especialmente para la región de Kazajistán, donde el arroz cultivado era del tipo *japonica* (Nesbitt, 2010).

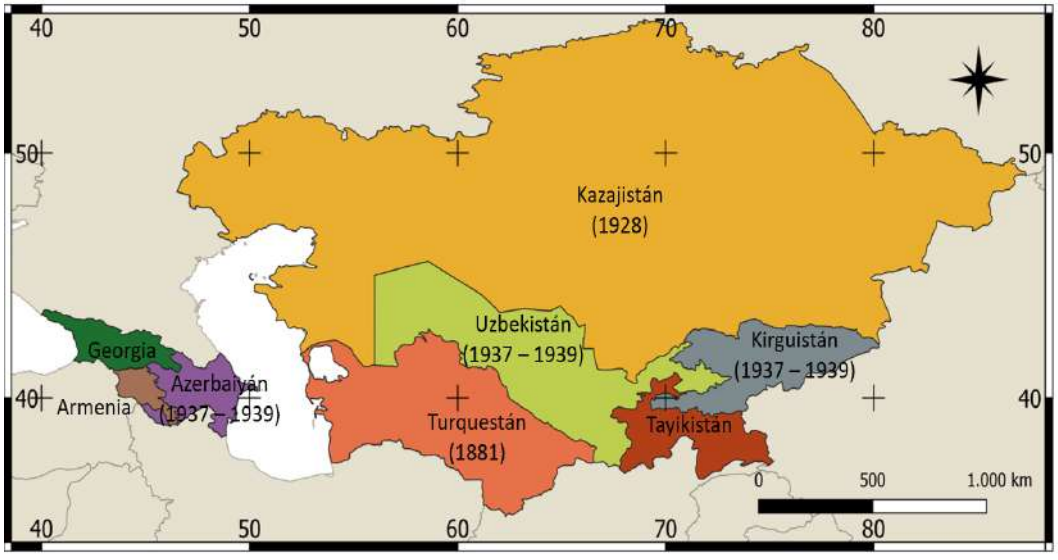


Figura 3. Primeras siembras de arroz en países de Asia Central.

La década de 1940 no favoreció la expansión del cultivo. Sin embargo, en 1950 la Unión Soviética empezó a concentrar mayores esfuerzos en el incremento de la producción de este cereal, lo que quedó demostrado con la incorporación de nuevas zonas de cultivo (suelos vírgenes), ubicadas en el centro y norte de Kazajistán (Kho, 1987; Tinsley, 1995).

En el año 1952 se sembraron 29.000 ha de arroz en Kazajistán, de las cuales 27.000 ha estaban ubicadas en la región de Kzyl-Orda. En 1960 la superficie sembrada aumentó a 95.000 ha y en 1972 a 462.000 ha, situación relacionada con la creación, implementación de grandes obras de regadío y al establecimiento de granjas estatales (Kho, 1987).

Diseminación del arroz a Asia del Sur o Asia Meridional

La difusión del arroz en el subcontinente se realizó desde la región del Ganges y/o del este de India (Odisha) en el tercer milenio y con una presencia importante en el siglo primero a. C., donde la mayor diseminación del arroz hacia Sri Lanka habría ocurrido en la Era del Bronce (Fuller y Qin, 2009). Los tipos de arroz encontrados en la región son *aus* (Bangladesh), ashina (arroz flotante de India), rayada (arroz flotante de Bangladesh), *aromatico* (Basmati de India y Sadri de Irán). Las variedades criollas de Irán e India pertenecen al tipo *indica* o *aus* (Nesbitt, 2010).

Afganistán. El arroz en Afganistán es un alimento importante y su cultivo está ampliamente distribuido en el país (Figura 4) y se postula que fue introducido desde la India (Khush, 1997). Actualmente existen dos tipos de arroz cultivados, el ´lok` que proviene de Turkestán y el ´mahin` que tiene su origen en India (Nesbitt, 2010).

Bangladesh. La información arqueológica en arroz es escasa (Figura 4). Los resultados obtenidos en Wari-Bateshwar (400 a 100 a. C.) y Vikrampura (Siglo XI y XVI a. C), sugieren que las poblaciones que habitaban estos lugares practicaban una agricultura basada, principalmente, en arroz del tipo *japonica* proveniente del sudeste de Asia y cultivado bajo condiciones de secano (Rahman et al., 2019; 2020). Esta situación podría implicar que los arroces tipo *indica* y *aus*, que dominaron en la agricultura de Bangladesh, fueron introducidos con posterioridad al arroz *japonica* (Rahman et al., 2020).

En la actualidad, la producción de arroz se realiza mayoritariamente en tres sistemas: secano, riego y flotante o de aguas profundas. Las variedades cultivadas se pueden dividir en cinco ecotipos: Boro; *aus* de trasplante; Aman de trasplante; *aus* de secano de suelos altos; arroz de aguas profundas o arroz flotante (Sattar, 2000). Por otro lado, un estudio genético de arroces provenientes de Bangladesh, Assam y el Occidente de Bengal permitió identificar a cuatro grupos de arroces: *japonica*; *indica*; y dos tipos de *aus*, *aus-1* y *aus 2*, donde el tipo *aus-1* está asociado al grupo ´Boro` (Travis et al., 2015).

Bután. El cultivo del arroz en Bután se realiza entre los 200 y 2.700 m de altura, lo que incluye condiciones tropicales y templadas (Figura 4). En las regiones de altura, el cultivo de arroz se siembra en terrazas. El rendimiento promedio del arroz es de alrededor de 2 t ha^{-1}. La introducción de variedades mejoradas de arroz en Bután comenzó en 1982, después del establecimiento del Centro de Investigación y Desarrollo Agrícola (CARD), actualmente Centro de Investigación y Desarrollo RNR, donde se han evaluado y liberado diversas variedades. En 1995, se estableció un programa de cruzamientos específicos con el IRRI, enfocado a mejorar el rendimiento, la calidad e incorporar resistencia a enfermedades, lo que ha redundado en un mayor rendimiento, rentabilidad para los agricultores y seguridad alimentaria para la población (Shrestha, 2004).

Nepal. El arroz fue introducido a Nepal en el siglo III a. C. (Figura 4), pero la producción comercial empezó sólo hace 500 años (Mallick, 1982; Agrama et al., 2010). El arroz en Nepal se cultiva bajo diferentes condiciones agroclimáticas: tropical, subtropical y templado caliente, a una altura de entre 100 y 3.000 metros y bajo condiciones de riego y secano. En la zona tropical (suelos ubica-

dos a baja altura) se producen dos cultivos al año, aunque en algunas zonas se pueden alcanzar tres cultivos al año. En la zona subtropical (suelos ubicados a una altura media) se pueden producir dos cultivos al año, mientras que en la zona templada caliente (suelos en altura) se produce sólo un cultivo al año. Además, el arroz se cultiva asociado o intercalado en rotaciones con maíz, legumbres y en un sistema integrado de arroz, y crianza de peces y aves como gallinas y patos (Gadal et al., 2019).

Pakistán. Posiblemente, el arroz llegó a Pakistán en el siglo IV (Figura 4), aunque se plantea que en la región norte del país podría haber ocurrido el cruzamiento de arroz *japonica*, proveniente de China, con la población proto-*indica*, que dio origen al arroz tipo *indica*.

El arroz en Pakistán se cultiva, principalmente, en dos regiones: Sindh y Punjab. En la región de Sindh se produce el arroz de grano largo fino y en la zona de Punjab el arroz basmati. Al igual que India, Pakistán exporta arroz Basmati, sin embargo, el precio obtenido por este tipo de arroz es menor al de origen indio. La producción de arroz se realiza desde el nivel del mar hasta los 2.500 m de altitud, lo que comprende valles y terrazas, regiones tropicales y subtropicales (Shahzadi et al., 2018).

Sri-Lanka. Sri Lanka es una isla tropical ubicada en el Océano Índico que ha tenido un lugar estratégico en la conexión del comercio marítimo entre Asia del Sur, Sudeste Asiático, y el Oriente y el Mediterráneo (Fuller et al., 2011). Desde finales del Holoceno y la Edad de Hierro, la población de Sri-Lanka adoptó diferentes estrategias de subsistencia como la caza, colecta y adopción de la agricultura. Esta última trajo aparejada la introducción de diferentes plantas cultivadas y la construcción de sistemas de riego entre otras tecnologías (Premathilake, 2006).

Algunos antecedentes señalan que el uso de arroz silvestre (*O. nivara*) podría haber ocurrido en Sri-Lanka alrededor del 4.780 a. C. (Premathilake et al., 2017). Sin embargo, los primeros indicios de la agricultura en Sri Lanka se remontan a principios de la Edad de Hierro, donde las comunidades estuvieron involucradas en la producción de arroz (Premathilake, 2006). Por otra parte, se postula que el arroz domesticado fue introducido a Sri Lanka desde el norte de India, alrededor de 500 a. C. (Figura 4) (Fuller et al., 2011; Silva et al., 2015; Murphy et al., 2018), aunque otros autores ubican al cultivo de arroz de riego a principios del período histórico, como una estrategia de diversificación en la producción de alimentos (Murphy et al., 2018).

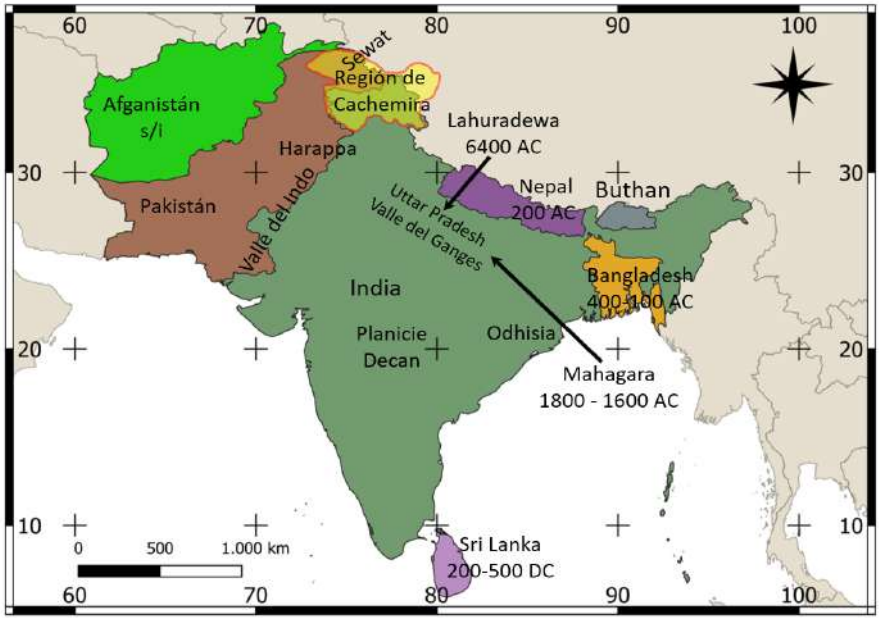


Figura 4. Primeras siembras de arroz en el Asia del Sur.

El análisis de restos arqueológicos colectados en la localidad de Kantharodai, península Jaffna y en Kirinda, en el sur de la costa de Sri Lanka, indicó la presencia de arroz cultivado y silvestre, con una mayor presencia de arroz tipo *indica,* en comparación a *japonica*. El arroz de riego detectado en Kantharodai fue fechado entre 300 a. C. y d. C. 200, y el de secano en Kirinda entre d. C. 500 y 600 (Murphy et al., 2018). Por otro lado, los restos encontrados en ambos lugares muestran una gran similitud de plantas cultivadas (arroz, mijo y legumbres) con algunos sitios del sur de la India, lo que sugiere una interconexión entre estas comunidades y estrategias económicas de sobrevivencia (Murphy et al., 2018). Otro estudio realizado en el puerto de Mantai, ubicado en la costa noroccidental de Sri Lanka, señaló que el arroz proveyó el alimento básico para el desarrollo de este asentamiento por varios siglos, desde 200 a. C. - d. C. 650 (Kingwell-Banham et al., 2018).

Diseminación del arroz a Asia Occidental o Medio Oriente

Siria e Iraq. La información disponible permite señalar que el arroz fue relativamente desconocido o marginal en el Medio Oriente hasta, al menos, el siglo XII a. C. (Figura 5), debido a la necesidad de un uso intensivo de mano de obra y a los altos requerimientos de agua (Miller, 2011; Muthukumaran, 2014). Se postulan dos rutas posibles de difusión del arroz al Medio Oriente: 1) a través del lado sur de los Himalayas hacia Bactria y luego a Armenia vía la costa sur del Mar Caspio; y 2) del sudoeste de India hacia el valle del Indo por mar, y luego a través de la costa sur de Irán a Mesopotamia. Además, se señala que la cultura del arroz no era común en Persia y Babilonia ante del período Islámico (Laufer, 1919). Los romanos podrían haber introducido el arroz a Siria, Palestina y Asia Menor (Sharma, 2010).

El otro elemento importante que influyó en la introducción del arroz a otras localidades como Iraq, Siria (Adshead, 1997) fue la expansión del islam y el desarrollo de nuevas tecnologías para el uso más eficiente del agua (Miller, 2011; Muthukumaran, 2014). Durante el período Fatimí, la parte sur de Iraq llegó a ser una zona productora de arroz. Posteriormente, se observa un mayor aumento de la superficie cultivada con arroz en las áreas húmedas o bien regadas de Iraq, noreste de Siria (región de Nusaybin) y Palestina (valle del Jordán) (Nesbitt, 2010). El arroz y el pescado fueron los principales alimentos de los habitantes del Estado de Khazaria en la región del Mar Negro y el Mar Caspio durante los siglos VII y X (Sharma, 2010).

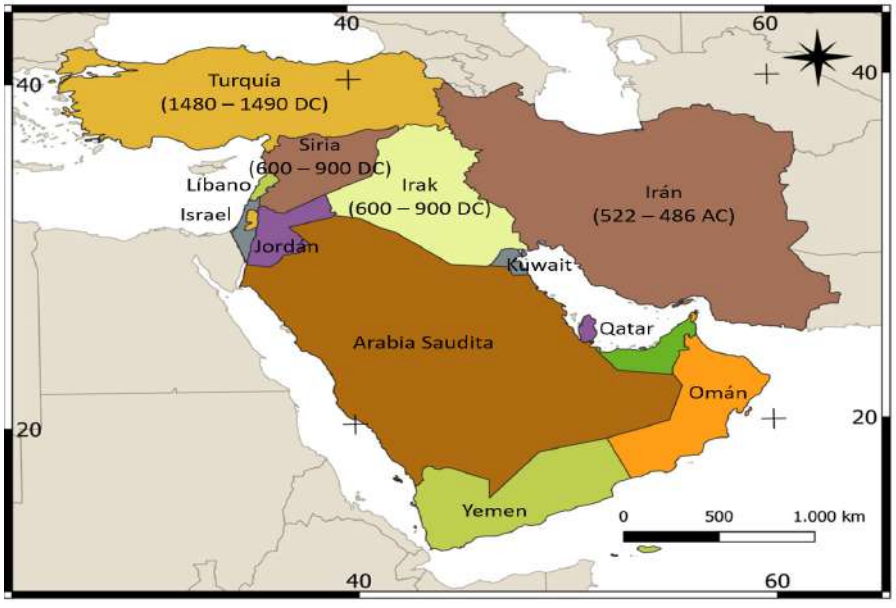


Figura 5. Primeras siembras de arroz en Asia Occidental.

Irán. La fecha de introducción del cultivo del arroz a Irán no es muy clara (Figura 5). Sin embargo, los primeros indicios de su presencia datan de comienzos del 2.000 a. C. en la planicie Kachi, en Pirak, al este de Irán. Otros datos provienen de Susa durante el Imperio Persa (Miller, 1981), donde se encontraron granos de arroz carbonizados e impresiones de restos de arroz en ladrillos, en varios sitios de la meseta del sur de Dez de Susiana, Juzestán, fechados 25 a. C. y d. C. 250 (Nesbitt, 2010; Miller, 2011), y una diseminación más tardía hacia el oeste (Zohary y Hopf, 2000). Sin embargo, la evidencia señala que a pesar que el cultivo de arroz pudo haber jugado un rol en la agricultura Persa-Sasaniana, ésta fue limitada y estuvo restringida a suelos bajos aptos para el cultivo en el sur de Mesopotamia y el suroeste de Irán (Nesbitt, 2010).

El origen del arroz encontrado en Irán está relacionado con su interacción cultural con India, entre Harappa y Mesopotamia en el período Aqueménida, probablemente en el siglo IV a. C. (Miller, 1981). Por esta razón se postula que el arroz de Irán posiblemente provino de la India (Miller, 1981; Nesbitt, 2010) y que incluyó a los arroces aromáticos (Kovach et al., 2009). Durante el período Aqueménida, el reino de Darío El Grande (522-486 a. C.) se extendió hasta el río Indo, donde pudo haber conocido e introducido el arroz a Irán (Sharma, 2010). Otra posibilidad es el ingreso del arroz a la parte occidental de Irán y Mesopotamia, a través de los comerciantes del este de Irán para su propio consumo (Muthukumaran, 2014).

En Irán, el arroz juega un papel importante en la dieta de la población, pero también en diferentes ceremonias como casamientos, fiestas (*Zereshk Polow*), funerales (*Kishmish Polow*) y celebraciones del año nuevo (*Sabzi Polow*, con pescado frito), platos tradicionales (*Nan Berenji*), pan y *Koofteh Berenji*, hecho de carne y nueces. Irán es la tierra de las variedades aromáticas ´sadri` que son únicas en el mundo (Nesbitt, 2010).

El 80 % del arroz se cultiva en dos provincias ubicadas en el norte del país, Guilán y Mazandarán, cerca del Mar Caspio y en menor medida en Zanyán, Golestán, Juzestán, Isfahán, Fars y Jorasán (Nesbitt, 2010).

Turquía. Una posible ruta de diseminación del arroz y su cultivo hacia el oeste fue desde la India a Irán y posiblemente desde allí a Turquía. El arroz estuvo disponible en el Bizantino Trebisonda en 1292, aunque era muy probable que haya sido importado a través del Mar Caspio (Faroqhi, 1993), ya que se menciona a la introducción del arroz al Imperio Otomano como una importante innovación tecnológica traída, probablemente, desde el sudeste europeo por los turcos (Hütteroth, 2006). De acuerdo a las estadísticas oficiales del Imperio Otomano, el arroz fue introducido alrededor de los años 1480 y 1490, en el valle de Maritsa y alrededor del año 1533 en el delta de Sofía (Figura 5) (Hütteroth, 2006).

En el Imperio Otomano predominaba la producción de granos como trigo y cebada y, en menor medida, el centeno y avena en algunas zonas de los Balcanes (parte oriental de Anatolia), junto a una pequeña superficie de olivos, arroz y hortalizas (Hütteroth, 2006). De acuerdo a esta información, el arroz se cultivó en pequeñas cantidades en el siglo XIV y en el siglo XV, en las localidades de Seres, Drama, Komotini, Verria y Menlik. Sin embargo, en el siglo XVI su consumo sufrió una mayor connotación social, pasando a ser un producto suntuario y de prestigio en la cocina de la clase alta (Adanir, 1989; Faroqhi, 1993), por lo que es probable que los oficiales del Imperio hayan ayudado a expandir su consumo (Faroqhi, 1993). Debido a esta situación, la élite decidió invertir para promover el cultivo del arroz. Es así como el arroz se empezó a sembrar en los valles cerca de los ríos y en las partes bajas de la costa, en Beypazari cerca de Ankara, Boyabat cerca de Sinop, y en los suelos planos de Cukurova en Cilicia. La meseta de Antakya se llegó a convertir en una región arrocera y el valle del Maritsa, en los Balcanes, se llegó a transformar en un centro de producción de arroz (Adanir, 1989).

En este contexto, el Estado se encargó de difundir el cultivo a diferentes regiones del Imperio y a controlar en parte la producción (Hütteroth, 2006; Evered y Evered, 2016), con participación de las

poblaciones semi-nómadas (Inalcik, 1994). En el sur de Anatolia, a principios del siglo XVI, estas poblaciones compartían la crianza y la producción animal que se realizaba en las colinas con la agricultura de los suelos bajos, donde producían arroz y otros cultivos (Inalcik, 1994). En las siembras de arroz controladas por el Estado, éste distribuía y pagaba la realización de ciertas labores como el manejo del agua y la trilla, entre otras (Hütteroth, 2006). Por otro lado, los líderes tribales eran los encargados oficiales de la producción de arroz y de pagar el tributo al Sultán, estando sometidos a sus normas (Adanir, 1989). De la producción de arroz se separaba semilla para la próxima siembra y el resto se vendía en el mercado, donde un experto local fijaba el precio del producto. Del total recaudado se pagaba una parte al Sultán y el resto se distribuía entre los productores.

El Imperio regulaba el uso del agua, y también la cantidad de arroz que los agricultores podían sembrar (Inalcik, 1994). Dada esta situación, a finales del siglo XVII, la administración Otomana realizó grandes intentos para convertir la población nómada en sedentaria y, de esta manera, facilitar el cobro de impuestos (Inalcik, 1994).

En los centros urbanos otomanos había una gran demanda por el arroz. Era un ingrediente básico en la dieta y se servía especialmente en los hospitales, conventos y palacios reales. En la mayoría de las comunidades rurales y ciudades se consumía el plato llamado ´pilaf` (Evered y Evered, 2016). La difusión y el consumo del arroz en el Mar Negro, los Balcanes y en el sudeste de Europa siguió la huella del ejército Otomano (Evered y Evered, 2016).

A finales del Imperio Otomano, el cultivo del arroz empezó a tener un mayor control privado y fue controlado por personas influyentes. En el siglo XVIII, el arroz tuvo un aumento importante en la superficie cultivada, producto del establecimiento de grandes granjas en varias zonas de los Balcanes (Hütteroth, 2006). La expansión de los campos de arroz, en número y tamaño, permitió la substitución de las importaciones de arroz desde Egipto e India. Posteriormente, debido a la aparición de la malaria (1880-1890) los campos de arroz sufrieron de constantes restricciones (Evered y Evered, 2016).

A partir de los últimos 30 o 40 años, el consumo del arroz aumentó en forma considerable (Sürek, 1997). Actualmente, la producción de arroz se realiza en casi todo el país, pero está concentrada principalmente en la parte occidental y norte, en las regiones del Mármara y del Mar Negro. Casi 100% de las variedades de arroz que crecen en Turquía son del tipo *japonica*. En 1970, se iniciaron las actividades de mejoramiento genético con el establecimiento del Instituto de Investigación Agrícola de Tracia (Cömertpay et al., 2016).

Diseminación hacia el Sudeste Asiático

El Sudeste de Asia es el ´corazón` del arroz, aunque su diseminación desde su centro de origen no está totalmente clara (Castillo y Fuller, 2010; Castillo, 2017). Una vez completada la domesticación de la planta de arroz en China (4000 a. C.), comenzó su diseminación a otras regiones (Fuller y Qin, 2009; Fuller et al., 2010; Silva et al., 2015). En este contexto, se puede considerar que varias olas de agricultores neolíticos de diferentes orígenes (Castillo et al., 2017; Cobo et al., 2019) migraron desde el sur de China hacia el Sudeste de Asia, lo que involucró intercambios culturales, y la introducción de arroz y el mijo como un paquete tecnológico (Gao et al., 2020). Tradicionalmente, se plantea que el arroz habría llegado al Sudeste de Asia entre el 4.500 y 4.000 a. C. (Higham, 2004) o en torno al 3.400 a. C. (Gao et al., 2020). Sin embargo, la fecha más aceptada para la presencia de arroz domesticado en el Sudeste Asiático está alrededor del 2.000 a. C. (Oxenham et al., 2015; Castillo et al., 2016b; 2017; 2018a). Por otro lado, el primer arroz cultivado en el sudeste de Asia fue de secano, a diferencia del arroz de riego utilizado en China (Fuller et al., 2011; Dal Martello et al., 2018), lo que se puede deber a la falta de adaptación del arroz de riego a las nuevas condiciones locales (Gao et al., 2020).

La información disponible señala que el arroz cultivado en tiempos prehistóricos en el Sudeste de Asia fue del tipo *japonica* (Castillo et al., 2016b). Sin embargo, la ruta de la llegada del arroz

al Sudeste de Asia es un tema que no está totalmente claro y actualmente se plantean diversas hipótesis (Higham, 2004; Fuller et al., 2010; Bellwood, 2011b; Bellwood et al., 2011; Hung et al., 2011). Un estudio reciente basado en arroces carbonizados encontrados en 128 sitios arqueológicos de China y el Sudeste de Asia, señala que el arroz pudo ser introducido a través de dos rutas: desde el sur de China, a través de la costa de Fujian, vía una ruta marítima y/o desde las regiones interiores del sudoeste de China, como Guangdong y Guangxi; y/o desde el sudoeste de China desde las planicies de Yunnan-Guizhou como un grupo de cultivos hacia el sudeste de Asia (Gao et al., 2020).

Tailandia. El arroz fue uno de los cultivos más importantes en la prehistoria de Tailandia, como lo demuestra la evidencia arqueológica (Castillo y Fuller, 2010; Castillo, 2011; Castillo et al., 2016b; d´Alpoim Guedes et al., 2020), ingresando posiblemente desde China (Figura 6). La información disponible ubica a los primeros movimientos de agricultores en tres sitios ubicados en la meseta de Khorat en el noreste de Tailandia, entre el 1.700 y el 1.500 a. C. (Higham et al., 2015; d´Alpoim Guedes et al., 2020).

En relación al sistema de producción utilizado, se ha podido determinar que los primeros cultivos en esta zona (sitios BNW y Noen U-Loke, NUL) fueron de arroz *japonica* y en condiciones de secano (Castillo et al., 2016a; d´Alpoim Guedes et al., 2020). Sin embargo, a partir de las edades del Bronce y del Hierro se ha detectado la presencia de arroz de secano y de riego en la zona (sitio Ban Non Wat, BNW), lo que significó, posiblemente, un cambio social y económico importante en la comunidad (Castillo et al., 2018a). Este sistema de transición mixto (400 a 200 a. C.), con siembras de arroz de secano y de riego, permitió aumentar la producción y reducir los riesgos climáticos, y pasar al sistema de arroz de riego a finales de la Edad del Hierro (Castillo et al., 2018a). La presencia del arroz en la Edad del Hierro (220 a 700 a. C.) también ha sido confirmada en el sitio NBJ (Weisskopf, 2016; Higham et al., 2014). A finales de este periodo se empezó a observar una mayor proporción de arroz tipo *indica*, lo que sugiere la presencia más tardía de este tipo de arroz a la zona, y un desarrollo diferente e independiente de la India, del arroz de riego de BNW y el de Khorat (Castillo et al., 2018a). Esta información ha sido confirmada por otros estudios realizados en la zona (Higham et al., 2014). Estudios de isótopos muestran un aumento en el consumo de plantas C3 durante la Edad del Hierro, especialmente en NUL, lo que se interpreta como una dependencia del consumo de arroz que coincide con la intensificación de la agricultura (King et al., 2013; 2014), y la presencia de algunas herramientas de trabajo como azadones y echonas, y de infraestructura de riego (Higham, 2014; Wohlfarth et al., 2016; Castillo, 2017).

Zona central de Tailandia. En la zona central de Tailandia (valle Khao Wong Pracham, KWD) se ha detectado también la presencia de arroz de secano y mijo (Weber y Fuller, 2008; Weber et al., 2010), con algún riego eventual producto de inundaciones, debido a la ausencia de infraestructura de riego (d´Alpoim Guedes et al., 2019). Aparentemente, el arroz fue introducido a esta zona durante la Edad del Bronce (700 - 500 a. C.), llegando a tener una mayor importancia en la Edad del Hierro (500 a 200 a. C.). También se habría incorporado a Dvaravati (500 - 900 a. C.) en el valle del río Chao Phraya provincia de Lopburi (d´Alpoim Guedes et al., 2019; 2020), llegando a convertirse en un cultivo dominante en el primer milenio antes de Cristo. Esta situación produjo un aumento del consumo de arroz, una reducción de la importancia del mijo y del sistema de producción de arroz de secano (Weber et al., 2010).

De acuerdo al tamaño del grano del arroz encontrado, se podría concluir que el arroz producido en esta época fue del tipo *japonica* tropical (Weber et al., 2010; d´Alpoim Guedes et al., 2020) y con un pequeño porcentaje de arroz tipo *indica* (d´Alpoim Guedes et al., 2019). Estos resultados concuerdan con otras investigaciones realizadas en otras zonas de Tailandia (Castillo y Fuller, 2010; Castillo et al., 2016a; 2016b; 2018a) que señalan que la adopción del arroz *indica* no fue inmediata por parte de la población (d´Alpoim Guedes et al., 2019).

La evidencia más temprana de arroz domesticado en el subcontinente del Sudeste Asiático, proviene del sitio Khok Phanom Di (KPD), entre 2.000 y 1.500 a. C., ubicado en la costa de Tailandia, donde el arroz se cultivó cerca de los pantanos o con riegos eventuales provenientes de las inundaciones na-

turales. Bajo estas condiciones, el consumo de arroz estuvo integrado a una economía de subsistencia que incluía los recursos que provenían de los manglares ubicados cerca de sus asentamientos. En las fases tempranas de desarrollo de estas comunidades, el arroz se obtenía por intercambio con otras regiones, pero posteriormente fue adoptado como cultivo (Sarjeant, 2014; Castillo et al., 2017).

Península tailandesa-malaya. Un estudio realizado en dos centros de intercambio de productos (Khao Sam Kaeo, KSK y Phu Khao Thong, PKT) en la ruta de la seda marítima, ubicados en la península tailandesa-malaya, señaló que el arroz era el principal cereal en esta región y que posiblemente se cultivó bajo condiciones de secano en colinas y en terrenos con pequeñas pendientes durante la Edad del Bronce hasta comienzos de la Edad del Hierro (Castillo, 2011). Esta situación contrasta con lo observado en China, en el mismo período, donde el arroz era cultivado en suelos planos y de riego. Debido a esta situación, se plantea que el sistema de arroz de riego no se introdujo a esta región sino hasta el último siglo antes de Cristo (Castillo et al., 2016a).

El arroz cultivado en esta zona era del tipo *japonica* (Castillo et al., 2016a), lo que implica que en los primeros contactos entre la población de la península y la India no se introdujo el arroz tipo *indica* al Sudeste Asiático (Castillo, 2011), y que posiblemente se priorizó la introducción de otras especies que no existían en la zona (Castillo et al., 2016a).

Un estudio genético de arroces fechados entre 2.500 y 1.500 a. C., señaló la presencia de arroz *japonica* en todas las muestras tailandesas analizadas, provenientes de sitios ubicados en la provincia de Nakon Ratchasina y de la Península Tailandia y Malaya. Estos datos confirmaron también la información anterior, basada en mediciones morfológicas del grano, que indicó que el arroz *japonica* (Castillo et al., 2016a) había sido cultivado y consumido entre el 400 y 100 a. C. en la parte sur de la península (Castillo, 2011; Castillo et al., 2016a). Además, confirmó que el arroz tipo *indica* fue introducido a Tailandia en los primeros siglos a. C., lo que pudo estar relacionado con la presencia de un cultivo más intensivo y la formación del Estado Indio (Castillo y Fuller, 2010; Castillo, 2011; Castillo et al., 2018a).

Por otro lado, es probable que el arroz *japonica* tropical haya sido introducido tempranamente a las islas del Sudeste Asiático, desde la península tailandesa-malaya (Castillo, 2017). Aparentemente, el sitio KSK fue el punto de contacto desde el sur de Asia hacia el oeste y Asia del este, y las islas del Sudeste de Asia en el este. Otro análisis realizado en el sitio Khao Sek, cercano a KSK, también señaló la presencia de algunos restos de arroz, lo que permite confirmar que esta población conoció y consumió el arroz (Castillo, 2018).

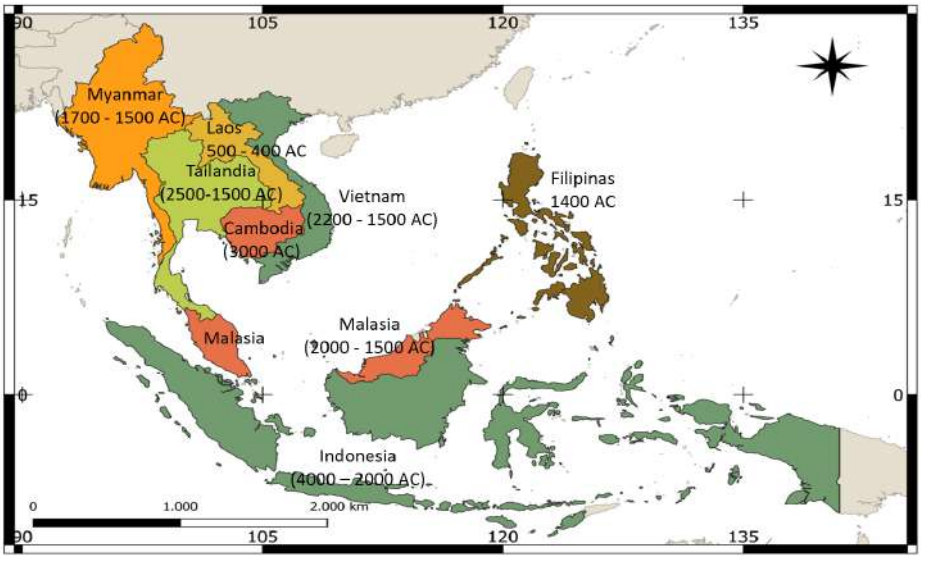


Figura 6. Primeras siembras de arroz en el Sudeste de Asia.

Vietnam. Aparentemente, las primeras poblaciones neolíticas que llegaron al sur de Vietnam, introdujeron el cultivo de arroz y mijo a la zona, entre el 2.200 y el 1.500 a. C. (Bellwood et al., 2011). Por otro lado, el asentamiento neolítico más antiguo en el norte de Vietnam, con evidencias de arroz *japonica*, está fechado alrededor del 2.000 a. C., representado por la Cultura Phung Nguyen (Bellwood et al., 2011).

Sur de Vietnam. La primera evidencia de la presencia del arroz en el sur de Vietnam proviene de la población Rach Nui, ubicada cerca del mar, entre el 1.500 y 1.300 a. C. (Castillo et al., 2017). La estrategia de consumo incluía recursos obtenidos de la pesca, caza y colecta (Oxenham et al., 2015; Castillo et al., 2017). Sin embargo, no existe evidencia que el arroz *japonica* encontrado se haya cultivado en esta zona o sus alrededores, por lo cual es muy probable que haya sido producto de un intercambio con otras comunidades (Castillo et al., 2017). Una situación similar fue encontrada en An Son, ocupado entre 2.300 y 1.200 a. C. (Bellwood et al., 2011). En este caso, los análisis genéticos demostraron que el arroz detectado (1.500 a. C.) pertenecía al arroz tipo *japonica* (Castillo et al., 2016b), con procedencia China (Zheng et al., 2016).

Norte de Vietnam. La presencia de arroz en varios sitios arqueológicos de esta zona, entre ellos Man Bac asociado a la cultura Phung Nguyen (2.000 a. C.), señala que el arroz era un producto bastante común para los vietnamitas y que estaba distribuido ampliamente. El tipo de grano encontrado era bastante variable en tamaño y forma, y estaba asociado a herramientas relacionadas con el cultivo del arroz (Huong, 2017).

Camboya. En Camboya no existe información de cuando se introdujo el arroz ni cuando empezó a cultivarse en el país, aunque se postula que el arroz tipo *indica* se podría haber empezado a cultivar en sitios inundables del centro de Camboya a principios del 3.000 a. C. (Vanna, 2002) y que la tecnología utilizada fue importada desde la India. Aparentemente, en el siglo XII a. C. se cultivaba arroz tipo *indica* en las terrazas de Leper King (Castillo, 2017). En esta época se construyó una gran infraestructura de riego que incluyó canales de regadío y tranques de acumulación de agua para fines productivos y rituales (Helmers, 1997).

Durante los siglos XIV a IX a. C. se desarrolló el período Angkoriano, cuya economía estuvo basada en el cultivo del arroz. El análisis de restos arqueológicos de un lugar cercano al Palacio Real Angkor Thom, entre los siglos XV y XIV a. C., detectó restos de una serie de cultivos donde dominaba el arroz (Castillo et al., 2018b). El análisis de los restos de arroz encontrado señaló la presencia de un alto porcentaje arroz domesticado, del tipo *indica*, aunque la presencia de aristas podría señalar la persistencia de granos tipo *japonica* (Castillo et al., 2018b).

Laos. Desde el siglo IV al III a. C. el arroz fue cultivado por pequeños agricultores, usando escasa tecnología a lo largo de la ribera de los ríos (Schiller et al., 2006). En Laos, el cultivo de arroz de riego está asociado con el grupo étnico Tai, proveniente del sur de China. En su migración desde China, este grupo étnico llevó el cultivo del arroz de riego, además de Laos, a Tailandia y a la parte alta de Myanmar. Esta situación permite suponer el cultivo temprano de arroz en varias provincias de Laos, como Vientiane, Khammouane y Savannakhet. Por otro lado, la existencia de canales de riego y acumuladores de agua en la parte sur de la provincia de Champassak, sugiere también que el cultivo de arroz de riego fue el principal sustento de la población, durante el período Khremer, desde el siglo XI al V. En este contexto, es importante señalar también que el grupo étnico Hmong y Mien (Yao), introdujo el cultivo de arroz de secano a Laos, entre los siglos XX y XIX (Schiller et al., 2006).

Malasia. La llegada del arroz al archipiélago de Malasia estuvo asociada a la difusión de población malayo-polinésica, entre el 2.000 y 1.500 a. C. Se postula que esta población se desplazó al norte de Japón, llevando el cultivo de riego del arroz con ellos o, probablemente, hacia el sur y el occidente a Palawan (200 a. C.), Sarawak (500 a. C.), Sumatra (1.000 a. C.), Tailandia, Vietnam y Camboya. Sin embargo, no existe evidencia directa que pueda comprobar esta información (Hill, 2012).

Islas del Sudeste de Asia. La planta de arroz domesticada estuvo ausente de la agricultura en las islas del Sudeste Asiático con anterioridad al 3.000 a. C. (Denham, 2013). La información disponible

señala que el inicio de la agricultura en esta zona se basó en plantas que fueron cultivadas y domesticadas en las islas y en Nueva Guinea, como son los tubérculos y árboles nativos. Esta situación se mantuvo sin mayores cambios hasta el advenimiento del Neolítico, con excepción de la inclusión del arroz como un cultivo secundario. Así se refuta la hipótesis de la introducción de prácticas de cultivo a las islas del Sudeste Asiático desde Taiwán alrededor de 4.500 y 4.000 años atrás (Denham, 2013).

Indonesia. Indonesia tiene una amplia cultura arrocera y el origen de uno de los tipos de arroz clasificado como *javanica* (Oka, 1988), cultivado en Java durante el siglo IX a. C. (Castillo, 2017), clasificado hoy como *japonica* tropical (Garris et al., 2005). Actualmente, este arroz se encuentra presente principalmente en Indonesia, en los suelos altos de Taiwán, y en las montañas de la cordillera de Filipinas, a diferencia del tipo *indica* que está distribuido en los suelos bajos en el Sudeste de Asia (Castillo, 2017).

A pesar de la importancia del arroz en Indonesia, no existe información precisa sobre la introducción del cultivo a esta zona. Algunos datos señalan que el primer sistema de cultivo de arroz en la zona occidental de Indonesia (5.000 a 3.000 a. C.) se realizaba en las colinas o en suelos con pendiente suave y se basaba en la quema de la vegetación y la posterior siembra mixta de arroz y mijo por unos años, la que luego se abandonaba para iniciar este ciclo en otro lugar (Bellwood, 1997). En este sistema, los agricultores usaban las cenizas de los volcanes como fertilizantes (Wisseman, 2007). Las actividades volcánicas y las necesidades de un mayor intercambio de productos llevaron a la población a instalarse en los suelos bajos y adoptar el cultivo de arroz de riego que le proporcionaba la oportunidad de utilizar suelos más fértiles y obtener una mayor producción y estabilidad. A pesar de esta situación, el sistema de arroz de riego llegó a adquirir importancia sólo a comienzos del siglo X a. C. (Wisseman, 2007).

Por otro lado, se señala la presencia de arroz en el noroeste de Borneo, alrededor del 4.000 a. C. y en Bali el 2.000 a. C. (Bellwood et al., 1992). A finales del período neolítico, los agricultores arroceros de Java y Bali se establecieron, primero en suelos con pendientes suaves ubicados entre 50 y 400 m sobre el nivel del mar y cerca de los volcanes, en vez de la costa (Wisseman, 2007). Dada las similitudes de condiciones de suelo y clima de Bali y Java, las fechas pueden ser muy similares, aunque la llegada del arroz *japonica* a Bali pudo haber ocurrido alrededor del siglo II a. C. (Castillo y Fuller, 2010; Castillo, 2011).

La información disponible en el siglo IX a. C. señala que el arroz era el principal cultivo de subsistencia de las islas, que se intercambiaba en el mercado y era una base importante de los impuestos. Durante este siglo, se cultivaba arroz *japonica* tropical y no el tipo *indica*, a pesar de los contactos de Java con India, especialmente en el primer milenio (Castillo, 2017). En esta época, los sistemas de cultivo de arroz de riego y secano ya estaban establecidos, y el Estado se mostraba muy interesado en promover el cambio de la agricultura de secano a un cultivo más intensivo de arroz de riego (Wisseman, 2007).

Un estudio reciente realizado en una muestra de arroz del siglo IX a. C. de la población *javanica* del reinado de Mataram, Java Central, identificó al arroz recuperado como *japonica* tropical, (Castillo, 2014), similar al tipo de arroz cultivado en la península tailandesa-malaya un milenio antes. Estos datos demuestran que, a pesar de los contactos de los pobladores de Java con India, se continuó sembrando arroz *japonica* tropical en la zona durante el primer milenio a. C. (Castillo, 2017).

Filipinas e Islas Batanes. La evidencia arqueológica más temprana de arroz en Filipinas se encuentra en Andarayan, ubicado en el Valle Cagayán, con anterioridad a 1.400 a. C. En este sitio se encontró una mezcla de arroz silvestre y cultivado, lo que indicaría que el arroz no estaba totalmente domesticado y que su cultivo se realizaba bajo condiciones de secano, utilizando el sistema de producción de quema de la vegetación existente, siembra del cultivo por algunos años y abandono del lugar (Snow et al., 1986).

Un estudio detectó la presencia de arroz y mijo en las Islas Batanes y el norte de Luzón, traídos probablemente desde Taiwán, alrededor del 2.800 a. C. (Bellwood y Dizon, 2005; Hung, 2005). Un aspecto característico del cultivo de arroz en Filipinas es la siembra de arroz en terrazas. Un estudio realizado sobre este tipo de cultivo en el norte de Filipinas (Ifugao) y el uso del riego, señaló que este sistema de cultivo había nacido como una respuesta de escape de la población filipina que trabajaba en los suelos bajos, a los conquistadores españoles entre los años 1.600 y 1.800. Este cambio de sistema de cultivo le habría permitido a esta población escapar del dominio español, afirmar su identidad étnica y enfrentar, de esta manera, la mayor demanda de alimentos de esta población (Acabado et al., 2014).

Diseminación a Oceanía

Papúa Nueva Guinea. La agricultura en Papúa Nueva Guinea empezó, posiblemente, en el año 7.000 a. C., con la domesticación de varias especies (Bourke, 2009; Denham, 2011), lo que continuó con la introducción de otras nuevas (Bellwood, 2011b). Sin embargo, la introducción del arroz a la isla ocurrió recién alrededor del 1.900 (Figura 7), con la llegada de exploradores europeos, asiáticos y de las islas del Pacífico (Bourke, 2009).

Australia. El arroz fue introducido al norte de Australia por inmigrantes asiáticos, alrededor de 1426 (Figura 6), aunque se menciona también a los buscadores de oro chinos como responsables de la introducción del arroz en la parte sur de Australia (Falvey, 2010). En este aspecto, se señalan dos razones por las cuales las migraciones malayo-polinésicas no habrían sido capaces de introducir el arroz a Oceanía: 1) la migración desde Filipinas vía las Marianas hacia Bismarck, habría tomado una ruta muy larga y difícil para ser exitosa; y 2) la diseminación del arroz hacia el sudeste, a través de Indonesia, no pudo continuar debido a la resistencia de la población Papuana, dominante en aquella época en Nueva Guinea, y que no tenía interés en adoptar el arroz como alimento, ya que poseía otras fuentes indígenas para ello (Bellwood, 2011a; 2011b).

A finales del siglo XIX se realizaron varios intentos por cultivar arroz en Australia, sin buenos resultados, hasta 1850 cuando la primera siembra de arroz tuvo éxito en el norte de Queensland, norte de Australia. Para apoyar esta actividad se desarrolló una pequeña industria en la zona, pero al poco tiempo el cultivo de arroz fue desplazado por la siembra de la caña de azúcar (Falvey, 2010).

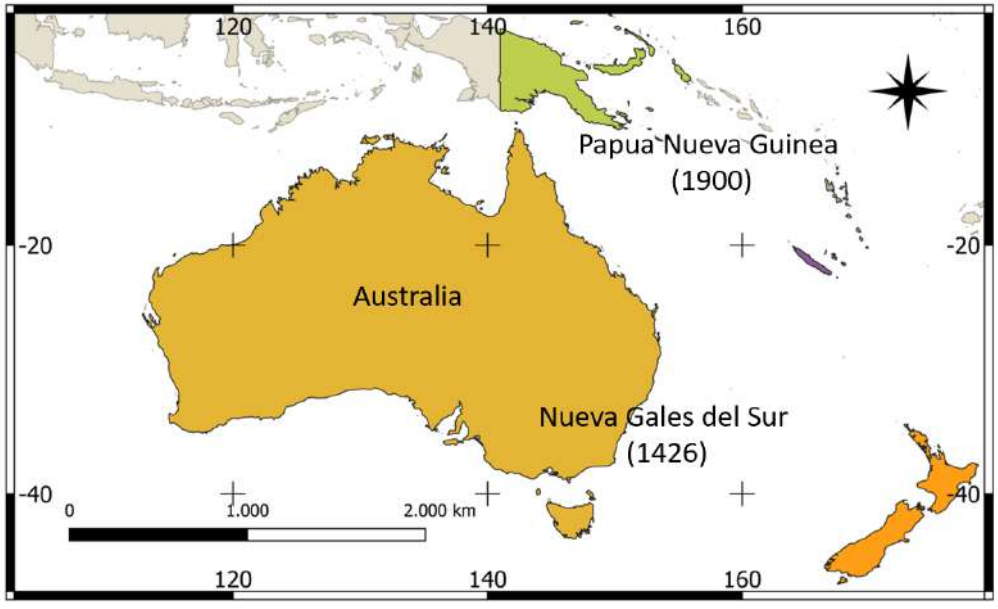


Figura 7. Primeras siembras de arroz en Oceanía.

A principios del siglo XX, el cultivo de arroz bajo riego se empezó a producir en la zona sur de Australia con buenos resultados. En el año 1914, el Gobierno de Victoria asignó una superficie de 80 ha en la localidad de Swan Hill, cercana al Río Murray, para demostrar la factibilidad de la producción de arroz en la zona. En esta oportunidad se utilizó semilla de arroz tipo *japonica*, introducida por el empresario Takasuka desde Japón (Falvey, 2010).

En el año 1915 se estableció la primera Estación Experimental Gubernamental de Arroz en Yanco, en 1920 se importaron variedades de arroz *japonica* desde California y en el año 1922 se ofreció esta semilla a los agricultores. En 1924 se realizaron las primeras siembras comerciales de arroz alrededor de la ciudad de Leeton y Griffith, con la semilla traída desde California por el Gobierno de Nueva Gales del Sur.

En 1928, el programa de mejoramiento genético de arroz empezó a producir variedades y comenzó a operar la industria arrocera australiana. Entre 1927 y 1928, la producción arrocera nacional abasteció las necesidades de la población australiana. Después de la Segunda Guerra Mundial, la zona de cultivo de arroz se extendió a otras localidades de la isla y el desarrollo del cultivo de arroz continuó con el establecimiento de ´Rice Marketing Board` y la empresa SunRice (Falvey, 2010).

Diseminación del arroz desde su centro de origen hacia Europa

La llegada de la agricultura a Europa se debió a varias migraciones de agricultores (Rowley-Conwy, 2011) y su producción estuvo restringida sólo a algunos países del sur. La fecha de introducción del cultivo de arroz a Europa no está muy clara. Sin embargo, la información disponible señala que su primer uso fue medicinal (control de dolor intestinal y lombrices) y en preparaciones cosméticas. El cultivo de arroz fue introducido a Grecia por Carlo Magno en el regreso de sus expedicionarios de la India en el 340 a 320 a. C. Más tarde, los árabes lo habrían introducido a España, Portugal e Italia. Sin embargo, sólo en los siglos XV y XVI, el cultivo de arroz se habría establecido en Europa (Khush, 1997; Spada et al., 2004). Los cultivares sembrados en Europa son principalmente del tipo *japonica* templado, aunque hoy día se cultiva una proporción menor de arroz tipo *indica* (Courtois et al., 2012).

El arroz ha recibido varios nombres dependiendo de las diferentes poblaciones. Es así como en latín se denomina ´*Oryza*`, los griegos lo llamaban ´oruza`, los árabes ´*Eruz*` o ´*Erouz*` y los españoles ´arroz` (ar-rozz) (Figura 8).

Bulgaria. La información disponible de su cultivo data desde el siglo XIV. Las principales regiones arroceras en Bulgaria son Plovdiv and Pazardjik dada su proximidad a los ríos Maritsa, Goiolnitsa y Chaia (Boyadjiev, 1996).

España. El arroz fue introducido a España por los moros durante la dominación de la península Ibérica (Sermet, 1953b; Crist, 1957). En sus inicios, el cultivo estuvo circunscrito al territorio valenciano (Crist, 1957; Calatayud, 2002). Aunque Valencia fue una colonia de poca importancia bajo el período romano, durante la presencia árabe evolucionó rápidamente, para transformarse en un gran centro agrícola, debido a la disponibilidad de suelos agrícolas fértiles bien regados y drenados, y al uso potencial de los suelos de pantanos. Estas características estimularon el establecimiento de la industria del arroz, la seda, el cáñamo, el papel y la cerámica (Crist, 1957).

Aparentemente, el arroz se empezó a cultivar en la zona baja del río Júcar, en Valencia, alrededor del siglo XIII, sobre el cual se estableció un impuesto (Sermet, 1953b). El cultivo del arroz estuvo asociado a pequeñas superficies de propietarios, arrendatarios y medieros, donde se podían obtener de dos a tres cosechas al año, dependiendo de la disponibilidad de agua y sistema de cultivo. La siembra y la cosecha del arroz se realiza con personas provenientes de otras regiones de España (Crist, 1957).

En el período de 1898 a 1910, Valencia llegó a sembrar el 80 % de la superficie total de arroz de España, lo que se debió, principalmente, a la incorporación de nuevos suelos arroceros en la zona del delta del Ebro y las marismas del Guadalquivir, producto de una legislación que apoyaba la desecación de los ´humedales`. Sin embargo, a partir de 1930 se produjo una disminución de la importancia del arroz en Valencia, como producto de la mayor producción en otras zonas de España (Crist, 1957). Es así como en el período 1921/1930 se empieza a producir arroz en la provincia de Sevilla (Calatayud, 2002) que poseía buenas condiciones de clima y suelo y se podía incorporar el cultivo de arroz con cultivos de trigo y avena, como una manera de diversificar el sistema de producción de esa zona (Crist, 1957).

A finales de la década de 1930 la producción de arroz llegó a ser muy importante en el Delta del Ebro (Dobby, 1938). La siembra del cultivo comenzaba con la quema del rastrojo de la temporada anterior y la preparación del suelo que incluía el paso de la ´tabla valenciana` (trozo de madera con puntas de fierro) para moler los terrones. El sistema de siembra era de almácigo y trasplante. La semilla utilizada provenía de la siembra anterior o era importada del norte de Italia, por su mayor tolerancia al frío. La plantación se realizaba con plantas de 20 cm de altura, colocando tres a cuatro plantas a una distancia de 25 cm. La fertilización era con guano animal y el control de malezas era realizado principalmente por las mujeres. La cosecha se realizaba en forma manual, sin esperar que la panoja estuviera completamente seca para evitar el desgrane (Dobby, 1938). Las empresas molineras proveían la infraestructura necesaria para el secado, almacenaje y elaboración del arroz, además del financiamiento para la compra de semilla, fertilizantes y preparación del suelo, lo cual era deducido del valor del producto cosechado (Crist, 1957).

A pesar de esta situación, el desarrollo del cultivo de arroz no estuvo exento de conflictos derivados de su posible relación con la malaria y el paludismo. Debido a esta situación, en el año 1562 la siembra del arroz fue prohibida cerca de las ciudades (Crist, 1957). Posteriormente, en el siglo XVIII y principios del XIX la siembra de arroz se podía realizar solamente si se tenía una concesión oficial (coto), de lo contrario era considerada ilegal (Sermet, 1953b). Esta reglamentación de ´cotos arroceros` terminó a fines del siglo XIX (Calatayud, 2002).

Actualmente, las principales regiones productoras de arroz en España son Cataluña, Valencia, Aragón, Andalucía y Navarra. España tiene tradición de consumo de arroz de grano medio con panza blanca, que se utiliza para la preparación de la paella (Ballesteros, 1997).

Portugal. El arroz fue introducido a Portugal en el siglo X por los moros (Jayamami et al., 2007; Courtois et al., 2012), iniciándose las primeras siembras experimentales en el reinado de Dom Diniz (1279-1325), pero sin éxito. Sin embargo, otra información señala la presencia del arroz en Portugal en el siglo XIV (Benoliel, 1928) o a comienzos del siglo XVIII en la región del estuario del Tejo (Baeta, 1997).

En los primeros momentos, el arroz no fue un alimento básico para la población portuguesa y el arroz consumido era importado de otros países. Es así como, a finales del siglo XV, Portugal importaba el arroz de la República de Guinea y a finales del siglo XVII lo compraba a Italia y a Carolina del Sur. Posteriormente, por razones económicas empezó a importar arroz desde su colonia en América del Sur, y ya entre 1767 y 1781 Portugal obtenía todo el arroz necesario para su consumo desde Brasil. Posterior a la independencia de Brasil, Portugal comenzó a incentivar la producción de arroz en su territorio. A partir de 1843 y sobre todo a partir de 1851, el cultivo del arroz en Portugal empezó a tener un mayor desarrollo, especialmente en el distrito de Coimbra, donde se llegó a tener una superficie sembrada de 1050 ha, en el año 1867 (Benoliel, 1928). Sin embargo, dada la asociación del cultivo de arroz con la malaria, a comienzos del siglo XIX el cultivo del arroz fue prohibido en varias partes del país, hasta que fue regulado oficialmente y relegado a lugares alejados de los centros poblados (Benoliel, 1928; Carney, 2004).

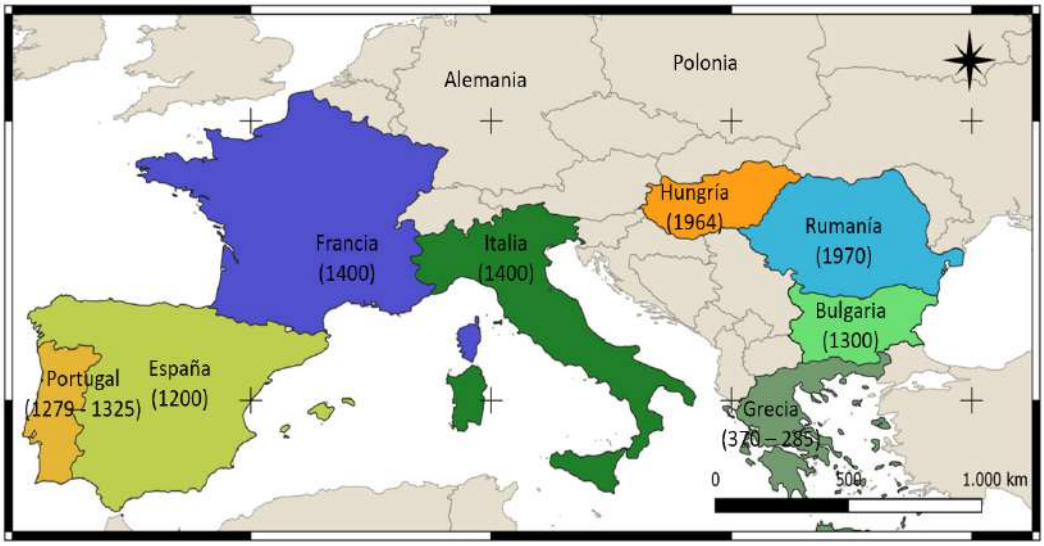


Figura 8. Primeras siembras de arroz en Europa.

Alrededor de 1930 se empezaron a establecer los primeros centros importantes de producción de arroz en varias regiones del país (Baeta, 1997; Jayamani et al., 2007), como en la zona norte en los valles de Vouga (distrito de Aveiro) y Mondego (distrito de Coimbra); zona central en los valles de Río Tajo y Sorraia (distrito de Santarem); y en la zona sur con arrozales del Sado (distrito de Setubal). La producción nacional, incluía el ´arroz blanco` de buena calidad que competía con el arroz extranjero, y el ´arroz país` o ´arroz rajado` (de color rojo), cultivado en los arrozales de Aveiro y Coimbra, destinado a abastecer los mercados locales, donde obtenía un precio superior al arroz blanco (Benoliel, 1928). En 1950, se sembraban, principalmente, variedades españolas ('Bomba`,´Tremesino`, ´Benlloch`, ´Sollana`) e italianas ('Vialone negro`, ´Maratelli`, ´Allorio`) en siembra directa y trasplante, y con el uso de una escasa tecnología (Sermet, 1953a).

Actualmente, la producción de arroz se realiza en la cuenca de Beira, río Mondego, río Sado y en los tributarios del río Tajo (Baeta, 1997). El arroz producido en Portugal corresponde a un grano redondeado, tipo Carolino, y un grano largo fino, donde el germoplasma portugués está constituido por 80 % de arroz *japonica* y 20 % de arroz tipo *indica* con ´acervo genético` *japonica*. En Portugal, el programa de mejoramiento genético fue descontinuado a mediados de 1980 y restablecido en el año 2004 (Jayamani et al., 2007).

Francia. El arroz fue introducido en el sur de Francia por los árabes, posiblemente en el siglo XV (Lami, 1952). Sin embargo, su mayor diseminación ocurrió cuando se ordenó el establecimiento de campos de arroz en Camarga, en 1593 (Beaux, 1975). En la década de 1840, se estableció el primer campo de arroz en el ´campo de Paulet`, para combatir la salinidad que amenazaba convertir a Camarga en un desierto y contener las inundaciones del Ródano (https://www.camargue.fr/site/riz-canavere/histoir.html). Hasta 1930, el cultivo del arroz se utilizó principalmente para desalinizar el suelo, prepararlo para el uso de otros cultivos como la vid, complementar la dieta de los animales y regular las inundaciones del río (http://www.fao.org/rice2004/en/p5.html).

Durante la Segunda Guerra Mundial, el arroz pasó a ser un alimento importante para la población y aumentó su producción (Beaux, 1975). Entre 1941 y 1948, el gobierno francés envió a cientos de vietnamitas de su colonia a trabajar en el cultivo del arroz en Camarga, lo que permitió la alimentación durante este período de escasez con el llamado ´Oro blanco`. En el año 1942 se sembraron 240 ha, pero su despegue en 1945 fue gracias a la aplicación del Plan Marshall que permitió la construcción de obras hidráulicas y la compra de equipos esenciales para desarrollar un cultivo intensivo. La superficie sembrada aumentó rápidamente de 400 ha en 1944, a 3.000 ha en 1945 y a 30.000 ha en

la década de 1960. En el año 1986 se creó el Centro Francés del Arroz (CFR) que empezó a realizar la investigación en el área. Este centro es dirigido por un comité directivo compuesto por agricultores, industriales, compañías de alimentos y centros de investigación como el INRA y el CIRAD (CFR, http://www.centrefrancaisduriz.fr/).

En 1986 la zona de Carmarga fue designada como un sitio Ramsar, Humedal de importancia internacional. Posteriormente, se estableció oficialmente como un parque regional y reserva natural, y en el año 2000, el arroz de Camarga obtuvo la Indicación Geográfica Protegida de Europa (European Protected Geographical Indication, PGI), que garantiza el origen, la calidad y trazabilidad de su producción (https://isrfg2016.cirad.fr/content/). Hoy, la producción de arroz en la región de Camarga se realiza con variedades del tipo *japonica* y, con un menor porcentaje, del tipo *indica* (Chataigner y Mouret, 1997).

Italia. El arroz en Italia fue introducido en varias oportunidades: por los árabes (Piacco, 1959), por el comercio de los venecianos (Cai et al., 2013), y por los españoles al norte de Italia (Robertson, 1935). Sin embargo, los primeros documentos oficiales ubican la introducción de arroz a Italia a finales del siglo XIV o mediados del siglo XV (Robertson, 1935; Efferson, 1952; Mongiano et al., 2018) en el Reino de Nápoles, lo que se relaciona con la presencia española en la segunda mitad del siglo XV, debido a la unión entre la familia de Aragón (reyes de Nápoles) y la familia Sforza, duques de Milán (Piacco, 1959; Faivre-Rampant et al., 2011). A pesar de esta situación, en los primeros tiempos el arroz fue considerado por su valor medicinal, cosmético y agente espesante, por lo que era muy caro e importado en pequeñas cantidades desde la India y no como un alimento para la población.

En el año 1468 se estableció el primer campo arrocero en Lombardía. Años más tarde, en 1475, el Duque de Milán, Galeazzo María Sforza, envió una carta junto a un saco de arroz al Duque de Ferrara como regalo, indicándole que podría cosechar 12 sacos si cultivaba el arroz adecuadamente (Caimo, 2019). El buen rendimiento del arroz en esa época se difundió rápidamente y permitió su siembra en las zonas pantanosas del valle del río Po y en otras áreas como Mantua, Verona, Vicenza y Treviso. A principios de siglo XIV había 5.000 ha de arroz sembradas, las que habrían aumentado a 50.000 ha para mediados del siglo XVI (http://enterisi.it/servizi/).

Lamentablemente, la expansión del cultivo de arroz coincidió con el aumento de la malaria, lo que llevó a tomar medidas para limitar la superficie sembrada y autorizar su siembra fuera del límite de las ciudades. A pesar de estas restricciones, las ventajas económicas que ofrecía el cultivo permitieron mantener la producción de arroz. Desde el Valle del Po, el cultivo de arroz se dispersó lentamente a la zona de Emilia y la Toscana. A principios del siglo XVIII, ya se sembraban alrededor de 20.000 ha en el territorio de Milán, las que aumentaron a más de 30.000 ha en los campos del territorio de Vercelli, un siglo más tarde. Posteriormente, la producción de arroz se concentró en las provincias de Vercelli, Novara y Pavia, seguido por Mantua, Verona, Vicenza, Padua, Reggio Emilia, Módena, Rovigo y Ferrara, con pequeñas superficies en Grosseto y en Toscana. Durante la Gran Depresión del 1929, los agricultores arroceros sufrieron una crisis que los llevó a la formación, en 1931, del ´Ente Nazionale Risi` que desde entonces ha apoyado el desarrollo técnico-económico del cultivo de arroz (http://enterisi.it/servizi/Menu/).

El desarrollo de variedades ha seguido también varias etapas en Italia. Comenzó en el siglo XVII con una fase de pre-mejoramiento y el uso de la selección masal como principal método de mejoramiento. Hasta la mitad del siglo XIX, se cultivó sólo la variedad ´Nostrale` que era una mezcla de diferentes tipos de plantas, susceptible a la tendedura y a *Magnaporthe grisea* (Mongiano et al., 2018). En 1839 el padre Jesuita Calleri importó, desde Filipinas, 43 variedades las que empezaron a evaluarse en diferentes regiones de Italia. Posteriormente, este germoplasma sirvió de base para el desarrollo de nuevas las variedades italianas. Sin embargo, el periodo de mayor progreso tecnológico se alcanzó cuando los agricultores vercelleses, junto a Benso Cavour y Vercelli, construyeron en 1853 uno de los sistemas más grandes y eficientes de riego (Caimo, 2019). Esta estructura compleja

fue mejorada en el año 1866, con la construcción del canal Cavour que permitía la transferencia de agua desde los ríos Po, Dora Baltea, Sesia, Ticino y el lago Maggiore (Robertson, 1938; Efferson, 1952). Algunas de las variedades sembradas entre 1850 y 1927 fueron ´Agostano`, ´Allorio`, ´Americano 1600`, ´Bertone` y ´Fulgente`, entre otras (Mongiano et al., 2018)

A mediados del siglo XIX, la zona norte de Italia tenía una baja productividad y producía trigo, maíz, arroz en Lombardía y Piamonte, y praderas en la cercanía de fuentes de agua. Sin embargo, en los años 1880 la competencia en trigo y maíz con U.S.A. y Birmania por el arroz, afectó económicamente a la zona. Esta crisis dio como resultado un aumento de la producción fruto del mejoramiento de la tecnología (maquinarias) y mayor uso de insumos como fertilizantes y nuevas variedades (Robertson, 1935; 1938).

La creación, en 1808, de la ´Stazione spérimentale di risicoltura` en Vercelli, significó un punto de inflexión en el mejoramiento de la calidad de las variedades producidas y utilizadas, trabajo que fue reforzado con la colaboración del ´Ente Nacional de Risi`. Esta situación permitió comenzar la realización de cruzamientos y la selección de nuevas variedades, por lo que la antigua estación experimental de Vercelli se transformó en una sección especializada del ´Istituto nazionale di cerealicoltura` (Caimo, 2019). En 1870 se sembraron las variedades ´Ostiglia', ´Bertone', ´Novarese', ´Francone` y ´Giapponese`. En 1903 se desarrolló la primera variedad italiana producto de selección masal (Mongiano et al., 2018). Posteriormente, se introdujeron desde Asia y otros países, nuevos germoplasmas (Mantegazza et al., 2008) como ´Originario Chinese` en 1904, ´Lady Wright` en 1925, ´Thaibonnet` 1992 (Spada et al., 2004). Luego se realizó una nueva importación de germoplasma desde Japón, India y China, para combatir el hongo *Magnaporthe oryzae*, principal problema sanitario del arroz de esa época, todo lo cual contribuyó a formar el germoplasma que sirvió de base para el desarrollo de las variedades italianas (Spada et al., 2004; Faivre-Rampant et al., 2011; Cai et al., 2013). Un estudio genético posterior confirmó que el origen de las variedades de arroz italiano se podía trazar al norte de China (Cai et al., 2013).

En 1925 se incorporaron las hibridaciones con germoplasma provenientes de U.S.A. (Mongiano et al., 2018) en los programas de mejoramiento genético públicos y privados que permitieron el desarrollo de variedades de arroz tipo *japonica*, de grano corto-redondeado (< de 5,2 mm) llamadas ´Comune'. Es así como, entre 1928 y 1962, las principales accesiones italianas eran ´Adelaide`, ´Chiapelli`, ´Arborio`, ´Balilla`, ´Carnaroli`, ´Fortuna`, ´Montova`, ´Precoce`, entre otras (Mongiano et al., 2018). Sin embargo, a partir de 1940 y hasta 1960, se empezaron a desarrollar variedades de grano medio (5,2 a 6,0 mm) y a comienzos de 1990 se introdujo el gen del enanismo. Hoy día, las variedades italianas poseen un grano más grande (> 6,0 mm), una relación largo/ancho menor a 3,0 (Mantegazza et al., 2008) y son derivadas de cruzamientos de variedades de arroz tipo *japonica* (Faivre-Rampant et al., 2011).

En la actualidad, Italia es el mayor productor de arroz de Europa y su producción se obtiene en las regiones de Lombardía y Piamonte (Efferson, 1952; Faivre-Rampant et al., 2011; Mongiano et al., 2018), correspondientes a variedades de arroz tipo *japonica* e *indica* que se desarrollan entre abril y octubre. Dentro de las variedades cultivadas se destacan aquellas destinadas a la preparación de paella, risotto (Mongiano et al., 2018), tipo arborio y carnaroli, que presentan diferencias agronómicas tales como precocidad, altura de la planta, peso y forma del grano, rendimiento industrial y resistencia a *Magnaporthe grisea* (Faivre-Rampant et al., 2010; Mongiano et al., 2018).

Alemania. Como las condiciones climáticas para producir arroz en el norte de Europa no eran las más adecuadas para el cultivo del arroz, es muy posible que el arroz encontrado en Alemania haya sido importado desde el Mediterráneo, Medio Oriente y/o haya estado asociado a funcionarios militares (Livarda, 2011). Es así como se encontró la presencia de un grano de arroz junto a otras especies vegetales, en un sitio destinado a rituales a los dioses Isis y Magna Mater, en el centro de Mainz, provincia romana de Alemania, con una data entre los siglos II a IV (Zach, 2002).

Grecia. Desde tiempos muy antiguos (370 - 285 a. C.), el arroz ha sido usado como medicina para tratar enfermedades digestivas. Sin embargo, se postula que el arroz llegó a Grecia como un producto alimenticio en el regreso de la expedición de Carlo Magno a la India entre el 340 y 320 a. C., y desde allí se habría diseminado a las localidades vecinas como Sicilia (Courtois et al., 2012).

Previo a la Segunda Guerra Mundial, el arroz era un cultivo secundario, aunque pronto empezó a adquirir una mayor importancia. En 1930, la superficie cultivada llegaba a 1.000 ha, mientras que entre 1951 y 1999 ya alcanzaba 30.000 ha. En 1958, el Estado empezó a mostrar interés por el cultivo de este cereal, creando el Instituto de Cereales Thessaloniki. Hasta 1969 sólo se cultivaban variedades de arroz tipo *japonica*, pero a partir de esa fecha se empezaron a producir variedades tipo *indica*. Las principales regiones productoras de arroz están ubicadas en el norte de Grecia, en Thessaloniki y Serres (Ntanos, 1997; 2001).

Rumania. La producción de arroz en Rumania empezó en la década de 1970 después de la primera visita del presidente de Rumania a China y Corea del Norte. Actualmente, la producción de arroz se destina al mercado interno como también a la exportación (https://en.wikipedia.org/wiki/Rice_production_in_Romania). El sur de Rumania posee una tradición arrocera. Las principales zonas productoras están ubicadas cerca del río Danubio, correspondientes a Braila, Lalomita, Calarasi Dolj y Timis (Allonte, 1997; Vijulie et al., 2016).

Hungría. El cultivo del arroz se realiza desde 1964, principalmente para el consumo interno. La producción nacional no satisface las necesidades de su población (Simon-Kiss, 1979).

Polonia. Un estudio realizado en el norte de Polonia, entre los siglos XIV y XV, identificó la presencia de algunos restos de arroz en el inventario de alimentos almacenados en un castillo, existente en el período Teutónico en 1385 (Badura et al., 2015). Aparentemente, el arroz tenía una alta demanda en el mercado. Al ser considerado un producto suntuario y de difícil acceso para la población, se usaba para pagar tributos, al igual que otros productos exóticos como la pimienta y el azafrán (Badura et al., 2015).

República Checa. Un estudio realizado en el Castillo de Praga encontró diversos restos de plantas de diferentes procedencias (África, Asia y América) introducidas en los siglos XVI y XVII, entre los cuales había algunos granos de arroz, lo que implica su consumo (Benes et al., 2012).

Croacia. La primera evidencia arqueológica encontrada en Croacia tiene como fecha el siglo II, en una instalación militar del Imperio Romano cerca del centro ´Colonia Aelia Mursa`, Osijek. En este contexto, el arroz representaba un producto poco común, suntuario y de alto estatus para la zona. Por lo cual, es muy probable que el arroz haya llegado a este lugar a través de la amplia red de comercio que permitía la difusión y el acceso de los productos mediterráneos a los diversos lugares que eran parte del Imperio (Reed y Leleković, 2017).

Ucrania. El primer campo de arroz en Rusia fue sembrado por orden del Emperador Pedro el Grande después de sus Cruzadas en Persia. En los países de la Comunidad de Estados Independientes (CIS), incluyendo Ucrania, el cultivo de arroz empezó sólo después de 1917. En 1926, los coreanos introdujeron variedades de alto rendimiento en Ucrania. En aquella época, el cultivo en la zona se producía en forma muy primitiva y estaba ubicado en los suelos inundados cercano a los ríos Yuzhny Bug, Dniester, Ingulets y Dnepr (Tinsley, 1995).

La ausencia de canales de drenaje, el deficiente sistema de manejo del cultivo y la falta de rotaciones resultó en la salinización del suelo, lo que redujo drásticamente los rendimientos y la superficie sembrada de arroz (http://rice.in.ua/en/istoriya-risovodstva). Sin embargo, a partir de 1961 la construcción de nuevos sistemas de riego en el área de Krasnoznamensk y Crimea del Norte, aumentaron en forma importante la superficie de siembra de arroz. En 1963, el Instituto de Riego y Pastoreo se transformó en La Estación Experimental de Producción de Arroz, la que en 1964 pasó a llamarse Estación Experimental de Investigación en Arroz de Ucrania. En el año 1990 se convirtió en la Academia de Ciencias Agrarias de Ucrania (UAAS), y en el año 2010 en el Instituto de Arroz de NAAN (Tinsley, 1995).

Diseminación del arroz desde su centro de origen hacia América

El arroz no era parte de la dieta de los aborígenes en la América precolombina, con excepción de algunas tribus amazónicas que recolectaban arroces silvestres (*O. glumipatula* Steud. y *O. grandiglumis* [Döll] Prodoehl) para su consumo (Cabezas y Espinoza, 2000). La introducción del arroz por los españoles al continente americano fue reforzada por el comercio y la introducción de esclavos africanos, quienes contribuyeron con su conocimiento y trabajo al desarrollo del arroz en algunos países del Caribe y en América continental.

El arroz ha estado asociado a la población latinoamericana como un alimento básico, pero también a la cultura de la población, estando relacionado a los conceptos de abundancia y fertilidad. Por ejemplo, el uso de la lluvia de arroz en el festejo a los novios después de la boda como una manera de solicitar una descendencia abundante y una buena vida, y a la cultura gastronómica, ya que en varios países existen variados platos preparados con arroz. Es el caso del arroz a la mexicana que se prepara con jitomate molido, chícharos y zanahorias; el arroz chaufa de Perú preparado en ´wok` con tortilla de huevo y cebolla china; el arroz con leche de Uruguay acompañado con dulce de leche; el arroz de Cuba con plátano y huevo frito; el arroz sudado de Colombia; el arroz guatemalteco combinado con pollo; los platos de risottos de los migrantes italianos en varios países; y el *Kamby arró*, postre de leche típico de Paraguay de origen guaraní, que es una crema espesa producto de la cocción con leche de vaca, aromatizada en algunos países con canela, cáscara de limón, vainilla, entre otros.

América del Norte

Estados Unidos de América. En U.S.A. el cultivo y la industria asociada al cultivo del arroz tienen una historia de más de 400 años (Surface, 1911; Carney, 2001a; 2001b) (Figura 9).

Carolina del Sur y Carolina del Norte. El primer intento de cultivar arroz en las colonias británicas se realizó en Virginia en 1647, aunque sin éxito (Surface, 1911). Sin embargo, a finales de 1680 y principios de 1690 se empezó a producir arroz comercialmente en Carolina del Sur (Surface, 1911) y en el año 1730 en Carolina del Norte (Rutger, 1998). La hipótesis más conocida es aquella que señala que el arroz fue introducido desde Madagascar el año 1691 y que se empezó a cultivar a partir de 1694 (Surface, 1911).

En Carolina del Sur la producción de arroz, en sus comienzos, fue considerada una actividad de la población negra (Lee, 1960). Dentro de los primeros tipos de arroz cultivados en esta zona había uno de cáscara y tegumento de color rojo, posiblemente *O. glaberrima*, el que se continuó sembrando para el consumo de los esclavos, hasta finales del siglo XVIII (Carney, 2001a; 2001b). Sin embargo, la semilla proveniente de Madagascar tuvo una mejor adaptación y rendimiento, y pasó a predominar en las siembras comerciales, tomando el nombre de arroz Oro (´Gold Rice`), dado el color amarillo de su cáscara (Lee, 1960).

Aparentemente, las primeras siembras de arroz se realizaron en suelos altos, donde se practicaba un sistema muy primitivo consistente en el corte, quema de la vegetación y siembra del cultivo por un par de años, y posterior abandono del lugar para iniciar este proceso nuevamente en otro sitio. Debido a la mayor demanda, el sistema de producción de arroz evolucionó, pasando a ocupar suelos bajos donde se podían distinguir tres tipos de siembra: 1) subsistencia, 2) pantano en suelos interiores y 3) pantano regado (Lee, 1960).

A partir de 1725, el arroz empezó a adquirir gran importancia, ya que la producción nacional se podía destinar al consumo interno y a la exportación. Esta situación llevó al Estado a ser exportador de arroz a finales del siglo XVIII (Surface, 1911; Rutger, 1998), aunque la Guerra Civil redujo considerablemente la importancia del cultivo (Carney, 2003).

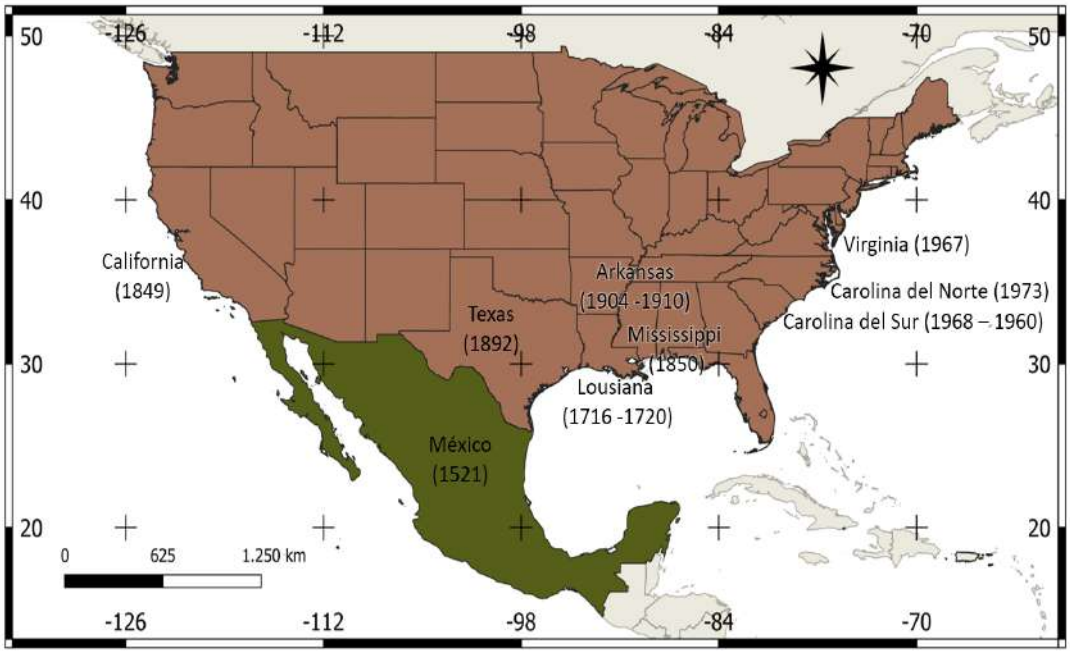


Figura 9. Primeras siembras de arroz en América del Norte.

Dada esta situación, los agricultores se vieron obligados a introducir nuevas tecnologías y aumentar los niveles de mecanización del cultivo (Knapp, 1903). Este cambio tecnológico fue apoyado por la invención, en 1787, y adopción de los molinos de agua para la elaboración del arroz. Este cambio tecnológico se tradujo en la incorporación de nuevas zonas arroceras (Knapp, 1903; Surface, 2011). Es así como, a partir de 1820, la producción de arroz se expandió hacia el sur a lo largo de la Costa Este, incorporando a los Estados de Georgia y Florida (Rutger, 1998), hacia el oeste a Kentucky y Tennessee, y a lo largo de las costas del Golfo a Louisiana y a la parte baja del delta del Mississippi. El arroz se introdujo en Arkansas en 1904 y en el delta del Mississippi en 1942.

En el año 1849, Carolina del Norte, del Sur y Georgia producían el 90 % del arroz del país, del cual un 60 % se producía en Carolina del Sur. Después del apogeo en la producción de arroz entre 1850 y 1860, el área de producción de arroz en U.S.A. empezó a decaer gradualmente, debido a la incapacidad de los agricultores y la industria de adaptarse a los nuevos desafíos, como la reducción del precio del grano, migración de los trabajadores arroceros a otras industrias, competencia de la producción de arroz en suelos no pantanosos en el Estado de Louisiana, uso de maquinaria moderna y nuevos sistemas de riego, ocurridos a finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX (Lee, 1960).

Louisiana. La fecha de la introducción del arroz a Louisiana no está muy clara. Al respecto se señalan varias alternativas, por ejemplo, desde las Indias Occidentales entre 1716 y 1720, desde las costas de Guinea, alrededor de 1719, o desde las Carolinas a principios del siglo XVIII (Lee, 1960). La evidencia botánica sugiere que la primera semilla de arroz sembrada en Louisiana fue el arroz ´Creole` o ´Arroz Bull` (‘Bullrice` o ´Bullhead`), un grano corto y delgado cuyo origen se remonta a las Indias Occidentales (Lee, 1960).

En los primeros cultivos de arroz en Louisiana se podían distinguir tres sistemas de producción: ´Arroz-providence`, cultivo en pequeña escala para autoconsumo y con poco o nada de riego artificial; arroz-río (Rice-River`), desarrollado bajo riego a lo largo del río Mississippi y dedicado, principalmente, a la producción comercial; y el arroz mecanizado sembrado en los suelos de pradera y de producción a gran escala (Lee, 1960).

Hasta 1850, el cultivo de arroz en Louisiana se realizaba principalmente en forma de ´Arroz-Providence`, aunque una pequeña cantidad se cultivaba a lo largo de la desembocadura del río Mississippi (´river rice`), el que alcanzó su mayor apogeo entre 1850 y 1885. A partir de 1885, la adopción de nuevas técnicas de riego, de preparación de suelo, diseño de los campos, construcción de nuevos sistemas de conducción de agua y drenaje, y el uso de semilla de mejor calidad como ´Carolina Gold` y ´Carolina White` que reemplazó al arroz nativo ´creole`, permitió un cambio radical del sistema de producción en Louisiana, desde el borde de los ríos (´river-rice`) a un sistemas más moderno e intensivo realizado en los nuevos suelos de praderas (Lee, 1960).

California. En 1849, la fiebre del oro trajo gente a California, entre ellos inmigrantes chinos que empezaron a sembrar variedades de arroz de grano corto y mediano para cubrir sus necesidades alimenticias. Los primeros intentos de producción de arroz en California se realizaron en 1850, como una manera de sustituir el arroz importado. Sin embargo, el primer ensayo exitoso fue realizado por el Ministerio de Agricultura (USDA) en ´Butte County`, en el año 1908. Ésta y otras experiencias dieron como resultado la selección de diversas variedades que fueron ofrecidas a los agricultores en forma gratuita para su siembra (Geisseler y Howarth, 2016). En el año 1911, el cultivo de arroz se expandió al valle de Sacramento, donde se inició la producción comercial de arroz en California (Chambliss y Adams, 1915; Geisseler y Howarth, 2016).

Texas. La industria del arroz en el sur de Texas empezó en el año 1892, con 71 ha en la localidad de Beaumont, las que aumentaron a más de 3.500 ha en 1899. El trabajo de mejoramiento genético de arroz, en su fase inicial, se focalizó, primordialmente, en la evaluación y selección de germoplasma, pero en 1931 el USDA estableció un Programa de Mejoramiento Genético cerca de Beaumont. En 1942 este programa liberó la primera variedad de arroz ´Texas Patna` (Tabien et al., 2008).

Entre 1890 y 1900, Louisiana y Texas produjeron el 75 % de la producción nacional de arroz, debido principalmente al uso de nuevos sistemas de riego, cultivo y cosecha mecanizada. Sin embargo, el producto cosechado era de calidad deficiente, debido a problemas en la elaboración industrial del grano y al uso de variedades de mala calidad.

En la actualidad, la producción de arroz en U.S.A. está concentrada, prácticamente, en seis estados: Arkansas, Mississippi, Missouri, Louisiana, Texas y California (Parveen et al., 1994). Un análisis realizado sobre la estructura genética de la población de arroz utilizado en U.S.A., identificó la presencia de los grupos *indica*, *japonica* tropical y *japonica* templado, cuyo origen se remonta a 1930. Sin embargo, algunos programas de mejoramiento usan con mayor frecuencia al tipo de arroz *indica* como progenitores, pero el 57 % de las variedades creadas responden a cruzamientos dentro de los tres grupos de arroces identificados previamente (Lu et al., 2005).

México. El primer informe de la presencia del arroz en México está fechado en 1521, inmediatamente después de la caída de Tenochtitlán, el que llegó posiblemente a través de la ruta del Océano Atlántico, aunque la fecha de los primeros cultivos no está clara (Osuna et al., 2000) (Figura 9).

Una de las hipótesis señala que el arroz pudo haber sido introducido a México en alguno de los viajes desde Manila o China al puerto de Acapulco (Osuna et al., 2000), a fines del siglo XVI, ya que la construcción de la flota de galeones ordenada por el rey Felipe II para la conquista de las islas Filipinas habría concluido en 1564 (Benítez, 1989; Osuna et al., 2000). Manila se convirtió en territorio dependiente del Virreinato de la Nueva España en el año 1565, estableciéndose a partir de entonces un intenso intercambio comercial y cultural entre el Lejano Oriente, América y Europa, donde Acapulco era el punto de enlace para otros destinos (Enrique, 1991; Romero, 2000; Sales, 2000). Sin embargo, otra hipótesis sostiene que el arroz habría sido introducido a México desde Senegal-Gambia, Occidente de África, como lo prueba el origen de parte de la gastronomía de México que se remonta al siglo XVI (Carney, 2011).

La primera siembra de arroz en el Estado de Morelos, en el municipio de Jojutla, se habría llevado a cabo en el año 1836, con la semilla de arroz ´morado` traída de Acapulco, desde la costa grande de Guerrero (Mateo, 1923). Adicionalmente, en 1838 se empezó a sembrar arroz en Veracruz con buenos resultados, lo que incentivó la diseminación del cultivo a otras regiones de la República Mexicana (Osuna, 1993). Es así como en 1930, el cultivo se realizaba principalmente en Morelos y Michoacán, pero a partir de 1940 otras zonas como Veracruz y Sonora empezaron a tener una mayor importancia en la producción nacional. Entre 1940 y 1950, Morelos dejó de ser el principal Estado productor de arroz en México, cediendo su lugar a Sonora. Entre 1960 y 1969, Sinaloa, Veracruz y Oaxaca se incorporaron a los estados que lideraban la producción de arroz en México (Pureco y García, 2017/2018).

En 1939, la superficie sembrada con arroz era de 70.800 ha, con un rendimiento promedio de 2,3 t ha^{-1}, en comparación al año 1950, cuando la superficie sembrada alcanzó 106.100 ha y un rendimiento promedio de 1,8 t ha^{-1}, lo que indica que los aumentos de producción de arroz, en este período, se debieron principalmente al aumento de la superficie sembrada. Los métodos de siembra utilizados eran al ´voleo` o directo y por almácigos o indirecto. Sonora, Michoacán y Veracruz utilizaban el sistema de siembra directa, en cambio Morelos, Puebla y el norte de Guerrero lo hacían en siembra indirecta (Pureco y García, 2017/2018).

América Central

El Salvador. En el siglo XVI el cultivo de arroz ya se producía en la Villa Sonsonate, El Salvador, Reino de Guatemala, lugar cercano al puerto de Acapulco, lo que podría haber favorecido la expansión del cultivo a esta localidad (Cabezas y Espinoza, 2000) (Figura 10).

Hasta los años 1940 y 1950, el cultivo de arroz se desarrolló con variedades criollas, cuyo rendimiento era muy bajo (entre 0,8 y 1,0 t ha^{-1}), con una producción nacional de 20.000 t. En 1944 se introdujo la variedad ´Fortuna` que se distribuyó a los agricultores para complementar las variedades criollas existentes como ´Pico Negro` y ´Pinganilla`. Desde 1950 en adelante se realizó un gran esfuerzo en la introducción y selección de nuevas variedades como ´Nirola`, ´Sunbonnet` y ´Bluebonnet 50` que produjeron mejores rendimientos (Artiga, 1970). Es posible que durante esa época se hayan cultivado variedades africanas (*O. glaberrima*), las que habrían sido introducidas y cultivadas por los esclavos. Estas variedades estaban relacionadas con variedades de Guinea, Liberia y Costa de Marfil (Artiga, 1970).

Guatemala. La información disponible no permite señalar el origen del cultivo de arroz en Guatemala. Sin embargo, se señala que en la temporada 1950/1951 se sembraron 8.000 ha de arroz lo que produjo 9.000 t. En 1967 se inició un programa de fortalecimiento de la producción de granos -entre los cuales estaba el arroz-, entre entidades nacionales con el apoyo de la Agencia Internacional de Desarrollo (AID) (Santamaría, 1970).

Panamá. El arroz fue introducido a Panamá alrededor del año 1582, posiblemente con la ayuda de los esclavos (Fusón, 1958; Cabezas y Espinoza, 2000). Panamá, por ser parte del Virreinato de Nueva Granada, tuvo una historia especial asociada al cultivo de arroz, debido a que era un centro comercial estratégico para el sistema colonial español. De Perú llegaba el oro y la plata al puerto Bello, y desde Sevilla y Cádiz llegaban los galeones con mercancías y para llevarse los minerales preciosos. A comienzos del siglo XVII, el cultivo de arroz ya estaba consolidado, produciéndose una gran cantidad alrededor del Puerto Bello, cuyo excedente se exportaba a Perú (Spijkers, 1983).

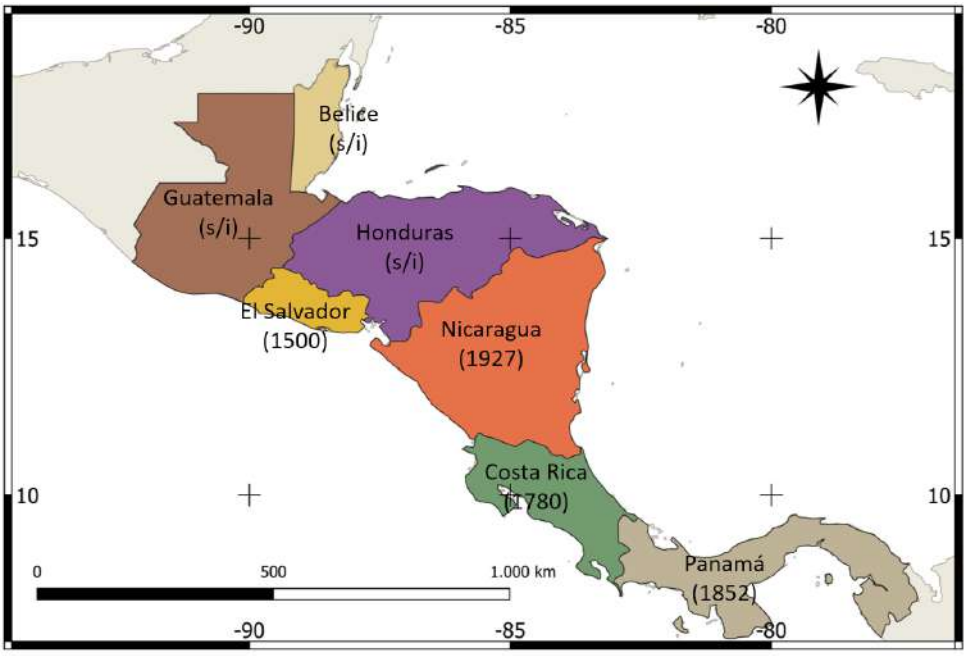


Figura 10. Primeras siembras de arroz en Centro América.

El arroz era un cultivo de subsistencia, producido principalmente por un gran número de agricultores y en condiciones de secano. La siembra se realizaba a finales de mayo y se cosechaba a mediados de octubre, pudiéndose lograr una segunda cosecha. Se sembraba temprano en otoño y se cosechaba a principios de enero, pero con bajo rendimiento. Uno de los factores limitantes en el cultivo de secano era el control de malezas, ya que afectaba negativamente el rendimiento, la calidad y el costo de producción (Fusón, 1958).

El consumo de arroz en Panamá alcanza los 65-68 kg por persona al año. La producción comercial está en manos de grandes agricultores que poseen sus propios molinos, secadores y lugares para el almacenaje del grano. Una pequeña parte de su producción se realiza bajo condiciones de riego y la mayor parte se lleva a cabo en la estación húmeda. El cultivo de riego del arroz es más productivo, pero más caro, por lo cual está fuera del alcance de los pequeños agricultores (Fusón, 1958).

El sistema de cultivo consistía en cortar los matorrales con machetes y hachas, y quemar la vegetación para preparar el suelo previo a la siembra. Esa labor era realizada en forma comunitaria por los hombres. El suelo se utilizaba solamente por 2 o 3 años, debido al aumento de las malezas y a la reducción de la fertilidad del suelo, lo que obligaba a buscar un nuevo lugar (Lee, 1960). La siembra se realizaba después de la primera lluvia, a fines de abril o mayo, utilizando un chuzo (o ´coa`, chuzo con mango) y ubicando la semilla cada 30 o 40 cm. Esta labor era ejecutada por las mujeres o toda la familia, incluidos los niños. El control de malezas se realizaba con un machete, dos o tres veces durante el cultivo. Para la cosecha se utilizaban, cuchillos, machetes, champas (machetes más pequeños) o cualquier elemento que permitiera cortar las plantas. Las plantas cosechadas se amarraban en ´manotadas`, las que eran apiladas en pequeños montones por varios días para permitir su secado al sol. Posteriormente, las plantas eran llevadas en grandes canastos (´motetes`) al lugar de almacenaje ´Jorón`. La trilla se realizaba golpeando las panojas con palos y el arroz era descascarado en el pilón (tipo mortero de madera con un pistilo) y aventado en una batea. El arroz producido se consumía principalmente en cada hogar y, si existía un excedente, era vendido a intermediarios o directamente a los molinos locales (Fusón, 1958; Lee, 1960).

En los años 1950, como la producción nacional era deficitaria, el gobierno estableció una política para incentivar la producción a través de créditos, fijación de precio y un control estricto de las importaciones. En 1960, el 75 % de las explotaciones panameñas tenía arroz en sus campos (von Chang, 1970). En 1975 se creó el Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) que ha sido la institución de investigación responsable del desarrollo de nuevas variedades y prácticas de manejo para el cultivo del arroz (Martínez et al., 2014).

Costa Rica. El arroz se empezó a cultivar en Costa Rica alrededor de 1780 en la zona de Esparza y el valle del río Grande de Tárcoles (Patiño, 1969; León y Arroyo, 2011), donde se llegaron a sembrar entre 5 y 7 mil ha en 1920. Otros autores señalan que el arroz se empezó a cultivar, después de la época de la Colonia, en las zonas altas y quebradas del país que ofrecían las mejores condiciones climáticas para el desarrollo del cultivo. Es así que, en muchos sitios de la meseta central como Atenas, Turrubares, Cebadilla Ciruelas, Puriscal, Santa Ana, entre otras, se sembraba arroz en el siglo XIX, por lo cual se llegó a llamar a esta zona como el ´granero` del país (Vargas, 1970; Tinoco y Acuña, 2008). A pesar de esta situación, el cultivo de arroz en la mayoría de estas localidades fue desapareciendo, debido a los problemas de erosión y a la imposibilidad de la mecanización del cultivo. El sistema de cultivo utilizado en la zona era bastante precario, donde los agricultores talaban los árboles y arbustos, quemaban la vegetación y luego sembraban el arroz por varios años, hasta que la erosión y la disminución de la fertilidad del suelo lo hacían improductivos (Vargas, 1970).

En la década de 1920 se empezó a producir arroz en el Pacífico sur, en la zona El Pozo. Durante este período, la superficie sembrada llegó a las 7.500 ha. En la década de 1930 se implementaron políticas proteccionistas para estimular una mayor producción de arroz, como la derogación de la importación de granos y el uso de nuevas tecnologías como el riego, llegando a convertir al arroz en uno de los cultivos importantes en el país (Tinoco y Acuña, 2008; León y Arroyo, 2011).

A mediados de 1940 se inició la importación de nuevas variedades como ´Rexoro', ´Nira', ´Carolino', ´Blue Rose', ´Zenith` y ´Fortuna', entre otras, que empezaron a reemplazar las variedades locales de gran desarrollo vegetativo, susceptibles a la tendedura y al desgrane, sin respuesta a los fertilizantes y susceptibles a las enfermedades (León y Arroyo, 2011). En 1949, el Ministerio de Agricultura estableció la primera Estación Experimental en la zona tropical Puntarenas, donde se inició la investigación sistemática del cultivo de arroz (Vargas, 1970). En 1953 se inicia el programa de producción de semillas mejoradas (León y Arroyo, 2011).

Nicaragua. El arroz es uno de los cultivos importantes en el sector agropecuario nicaragüense y al mismo tiempo es uno de los principales alimentos en la dieta de la población, con un consumo per cápita de 56 kg año^{-1} y con tendencia a incrementarse (Sandoval y Velásquez, 2017).

El cultivo del arroz fue introducido a Nicaragua en 1927. Los primeros cultivos fueron realizados por pequeños agricultores en condiciones de secano y donde todas las actividades agronómicas se realizaban en forma manual. Para ayudar a solucionar este problema, en 1942 se creó el Servicio Técnico Agrícola de Nicaragua que empezó a realizar actividades de evaluación y selección de variedades extranjeras. Es así como en los años 1960, las principales variedades sembradas en el país eran ´Rexoro`, ´Bluebonnet`, ´IR-8` y ´Nilo` (Vaca, 1970). Esta situación se mantuvo hasta 1963, cuando se comenzó a cambiar el sistema de producción de secano por el de riego. Este cambio de sistema de producción significó una revolución productiva que permitió la introducción de maquinaria, nuevas variedades y métodos de cultivo (Vaca, 1970; Sandoval y Velásquez, 2017).

A partir del año 1965, con la incorporación del arroz al programa Cooperativo Centroamericano de Mejoramiento de Cultivos Alimenticios (PCCMCA), se decidió profundizar el trabajo realizado en arroz. Así, en 1968 el Ministerio de Agricultura junto a la Universidad de Louisiana y la Asociación de Productores de Arroz establecieron un programa de investigación en arroz, cuyo objetivo principal era el desarrollo de nuevas variedades y prácticas culturales (Vaca, 1970).

Honduras. La información disponible no permite identificar la fecha de introducción del arroz a Honduras. Sin embargo, ellos señalan que los primeros cultivos se caracterizaron por el uso de escasa tecnología y la obtención de bajos rendimientos (SAG, 2003).

Antes de la década de 1960, el arroz se cultivaba principalmente en las zonas bajas del litoral atlántico (Cuyamel), en los Departamentos de Cortés, Olancho y Yoro, con superficies de siembra muy pequeñas donde predominaba la siembra a ´chuzo`. Las variedades más sembradas eran ´Zenith`, ´Fortuna`, ´Gulfrose`, ´Lira Blanco` y ´Lira Rojo`, entre otras, todas provenientes de U.S.A. como también una selección nacional llamada ´Honduras` (SAG, 2003). La mayoría de estas variedades era de grano largo con buena calidad molinera, aunque éste no era factor importante, ya que la mayoría del arroz se elaboraba en morteros de madera. En ese entonces la mayor parte del arroz se cosechaba a mano, cortando la espiga en forma individual. Se guardaba en mazos colgados arriba de las estufas o fogones por varios meses (SAG, 2003).

A partir de 1960, se inició un programa de introducción y selección de nuevas variedades, como ´Starbonnet`, ´Milo 3` y ´Belle Fetne` donde ´Bluebonnet-50` tuvo una buena aceptación por parte de los agricultores (Reyes, 1970).

A partir de mediados de los años 1960, el cultivo, la industria y el consumo de arroz en el país empezaron a mostrar cambios significativos. En primer lugar, se instalaron grandes molinos, se introdujeron nuevas variedades, se empezaron a cultivar mayores superficies y con una mejor tecnología y aumentó el consumo (SAG, 2003).

El Caribe

La introducción del arroz por los españoles a el Caribe fue reforzada por el comercio y la introducción de esclavos africanos que trabajaban en las plantaciones de la región. Una vez terminada la esclavitud se trajeron trabajadores de origen asiático, especialmente de India y China, para trabajar en las plantaciones de Trinidad y Jamaica (Berleant, 2012) (Figura 11).

República Dominicana. El arroz llegó a Santo Domingo (La Española) en el segundo viaje de Colón a las Américas. Con la ocupación y fundación de la ciudad de Santo Domingo en 1495, los españoles empezaron a realizar diversos intentos para cultivar el arroz en América para proveer alimento a sus colonos y reemplazar el trigo traído desde España (Cabezas y Espinoza, 2000). Es así como, en 1510, el rey de España manifestaba su preocupación por la producción de arroz en La Española a sus autoridades (Patiño, 1969). En 1512, los colonos españoles empezaron a cultivar arroz en pequeñas superficies de arroz para su subsistencia, hasta que a partir de 1880 empezaron a realizarse las primeras siembras de arroz en Santo Domingo. Éstas fueron de secano y con un rendimiento bajo que alcanzaba a cubrir las necesidades de la población. Sin embargo, a partir de 1892 el arroz empezó a adquirir mayor importancia debido a la política estatal que fomentaba la formación de fincas modelo en terrenos del Estado, otorgaba incentivos para la compra de maquinarias y semillas de buena calidad, importadas de las Indias o de las Carolinas, U.S.A. Estos incentivos permitieron incorporar zonas de cultivo bajo riego y aumentar la producción de 7.000 t a 18.000 t entre los años 1929 y 1932 (Serulle y Boin, 2010).

Puerto Rico. El cultivo de arroz se empezó a realizar en 1513 (Patiño, 1969) o desde 1935 (Cabezas y Espinoza, 2000), pasando a transformarse en un alimento básico para la población durante el período colonial (Cabezas y Espinoza, 2000). En 1788 se mantenían pequeños cultivos para el consumo interno en varios lugares de la Isla (Cangrejos y Humacao) y en 1885 ya se utilizaban máquinas para procesar el arroz después de la cosecha (Patiño, 1969).

Cuba. El arroz fue uno de los primeros cultivos introducidos en la isla por los españoles (Patiño, 1969). Tras el éxito del cultivo del arroz en Puerto Rico, éste se difundió a la isla de Cuba, Jamaica y todo El Caribe (Cabezas y Espinoza, 2000), donde se cultivó en pequeñas superficies

para el autoconsumo, hasta mediados del siglo XVII (Patiño, 1969). A inicios del 1800, los principales cultivos en los predios agrícolas eran la caña de azúcar y los cafetales, donde se sembraban pequeñas superficies de maíz, arroz, plátano y yuca en los suelos ´desmontados`. Las herramientas más usadas en el cultivo eran el arado, azadón o ´guataca` y el machete. El rendimiento en grano fluctuaba entre 0,6 y 0,9 t ha^{-1}, en un suelo fértil recién desmontado. Unos de los principales problemas era el escaso nivel tecnológico utilizado, la casi ausencia de caminos y el mal estado de los existentes, lo que impedía llegar físicamente a los mercados, y los altos costos del transporte disponible, como carretas y animales (Patiño, 1969).

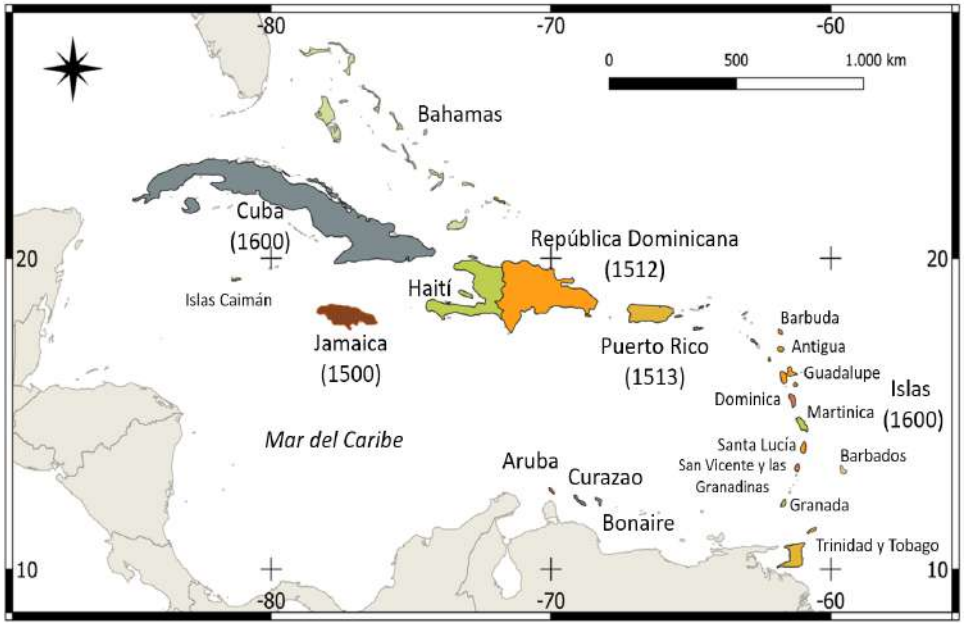


Figura 11. Primeras siembras de arroz en el Caribe.

En el año 1927 se inició el primer trabajo tendiente a desarrollar variedades, tomando como base el ´arroz criollo` o ´de la tierra` y la evaluación y selección de germoplasma proveniente de U.S.A. Este trabajo se realizó en la Estación Agronómica de Santiago de las Vegas, actual Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical ´Alejandro de Humboldt` (INIFAT). En el año 1980 se inició el primer programa de desarrollo arrocero, la creación del Banco de Germoplasma, el establecimiento de nuevas estaciones experimentales y el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de Cuba (Suárez, 2012).

Estudios realizados sobre la diversidad genética de las variedades mejoradas cubanas señalan una estrecha variabilidad genética, debido al uso de un grupo reducido de padres (Fuentes et al., 1999; 2003; 2004; 2005) y de selecciones o variedades locales de bajo potencial de rendimiento, de origen estadounidense, previo al inicio del programa de mejoramiento genético de arroz cubano (Alvarez et al., 2007).

Jamaica. Aparentemente, el cultivo de arroz estaba establecido en Jamaica en el siglo XVI, destinado a proveer de alimentos, a la flota en sus viajes desde y hacia España a principios del siglo XVII (Cabezas y Espinoza, 2000). En este contexto, se plantea que el arroz pudo haber sido introducido a Jamaica desde Puerto Rico o por los esclavos traídos de Cabo Verde, quienes habrían fomentado el cultivo dado el conocimiento que traían de su país.

Haití. Aparentemente, el arroz en Haití tiene una historia de más de 200 años. Su origen podría estar en África Occidental, aunque otros autores mencionan un origen europeo (Patiño, 1969).

Antillas menores. El arroz se habría empezado a cultivar en la isla San Cristóbal hacia mediado del siglo XVII (Patiño, 1969), donde pequeños grupos de inmigrantes de las Indias Orientales llegaron a Santa Lucía, Granada, St. Vicente, St. Kitts, como lo hicieron también los chinos a Antigua. Las necesidades dietéticas y preferencias de estos inmigrantes, reforzaron la presencia y el uso del arroz en estos países (Berleant, 2012).

América del Sur

Argentina. El arroz fue introducido al norte argentino desde Brasil, región donde se cultivaba también caña de azúcar, algodón, tabaco, trigo y maíz (Carcaño y Livore, 1991; Fernández y Rondina, 2006). Sin embargo, se señala también que el arroz producido en la provincia de Tucumán podría haber sido introducido desde Santa Cruz de la Sierra, Bolivia (Carcaño y Livore, 1991) (Figura 12).

El primer intento de sembrar arroz en la provincia de Corrientes, localidad de Riachuelo, fue el año 1913, utilizando semilla traída desde Valencia, España (Carcaño y Livore, 1991). A pesar de esta situación, entre 1909 y 1931 la producción de arroz en el país fue poco significativa y alcanzó a 3.500 ha que estaban distribuidas, principalmente, en las provincias de Misiones, Tucumán, Salta y Jujuy. En el año 1932, la implantación de una política de protección arancelaria permitió incentivar la producción (Carcaño y Livore, 1991; Herber et al., 2017) y extender el cultivo a otras provincias como Corrientes, Entre Ríos, la zona central de Santa Fe (Schultz, 1932; Carcaño y Livore, 1991; Scarpati et al., 2016) y hasta el Chaco y Formosa en la década del 1970 (Carcaño y Livore, 1991).

En los comienzos del cultivo en Tucumán se sembraron dos tipos de arroces: de riego (acuático) y de secano. La siembra del cultivo de arroz de riego comenzaba con la elección del suelo, el que debía arcilloso y nivelado para permitir una buena retención y distribución uniforme del agua en los cuadros. La preparación que comprendía araduras y rastrajes debían realizarse entre septiembre y principios de octubre. Los pretiles se construían a una distancia de entre 40 y 50 m en suelos bien nivelados y entre 10 y 20 m en suelos desnivelados. Los pretiles principales debían tener una altura de 40 a 50 cm de altura y los secundarios 30 cm (Schultz, 1932).

Las principales variedades sembradas eran ´Fortuna` (grano largo angosto), el ´arroz japonés', (grano corto y grueso), y en forma secundaria ´Bola Colorada`, ´Salteño` y ´Blue Rose`, todas las cuales poseían algún grado de mezcla. La siembra del arroz se realizaba entre el 20 de septiembre y 30 de octubre. El sistema de siembra dependía del tamaño de la explotación. Para extensiones grandes se recomendaba el uso de una sembradora y para superficies pequeñas la siembra manual o el uso de arados pequeños que realizaban surcos a una distancia de 30-35 cm uno del otro, colocando la semilla a una profundidad de 5 a 8 cm que se tapaba con una rastra de rama liviana. La dosis de semilla utilizada variaba entre 80 y 100 kg ha^{-1} (Schultz, 1932).

Cuando las plántulas alcanzaban 15 a 20 cm, se daba el primer riego o ´asiento`. Los riegos contribuían al control de malezas, el que se complementaba con el arranque a mano de las malezas o el uso del azadón, arados pequeños u otros implementos tirados por animales. Una vez terminado el control de malezas se procedía a inundar los cuadros. Los riegos se mantenían hasta que la espiga se doblaba por su peso. La cosecha se iniciaba cuando las hojas de la planta se empezaban a tornar amarillas, antes que los granos de la parte inferior de la panoja se endurecieran, para evitar el desgrane. La cosecha podía ser manual, cortando las plantas a 10 - 20 cm sobre el suelo y recogiéndolas en manojos abiertos, que una vez aireados, se engavillan y juntan sobre el suelo firme y seco, teniendo cuidado de no amontonar las gavillas húmedas, ya que se podían calentar y reducir la calidad del grano (Schultz, 1932).

La trilla se realiza golpeando las gavillas sobre un tablón y tirando las plantas de arroz a través de tablas con clavos en forma de peine para desprender los granos de las panojas. Posteriormente, se debía orear el grano para reducir su contenido de humedad antes de ponerlo en bolsas. Tam-

bién era recomendable aventar el arroz con máquina o al viento, para separar la paja del grano y de otras impurezas antes del envasado para la venta. En la provincia de Salta se usaba el sistema de trilla del arroz en una ´era` y con una manada de yeguas para pisar las plantas y desprender el grano. El rendimiento del arroz en esta zona era de 2 a 4 t ha^{-1}, aunque se podían obtener también entre 3,5 y 4 t ha^{-1} en extensiones limitadas (Schultz, 1932).

Para paliar los efectos negativos de la siembra continua del arroz en el mismo suelo, se recomendaba incorporar el guano de corral bien descompuesto y/o el rastrojo de la cosecha anterior o la siembra de una leguminosa como el caupí (*Vigna unguiculata*). El caupí podía ser cortado o pastoreado directamente por los animales o incorporado al suelo como abono verde. La siembra del caupí se podía realizar una vez cada 3 o 4 años (Schultz, 1932).

En la década de 1930 comienza el mejoramiento genético del arroz en Argentina, con la creación de las Estaciones Experimentales de Guemes (Salta) y de La Plata (Buenos Aires), dependientes del Ministerio de Agricultura. El germoplasma utilizado en los primeros trabajos de mejoramiento genético provenía de Brasil y de U.S.A., al que se incorporó posteriormente el germoplasma italiano (Giarrocco et al., 2007). Algunas de las primeras variedades seleccionadas en la Estación Experimental de Salta fueron ´Blue Rose sel. M.A.`, ´Japonés Gigante sel. M.A.` y ´Yamani sel. M.A.` (Carcaño y Livore, 1991). En 1932 se inició el trabajo de mejoramiento genético en la Estación Experimental de Arroz de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la Plata, del cual se liberaron las primeras variedades obtenidas por medio de cruzamientos: ´Victoria F.A.`, ´Cumé Man F.A.`, y ´Chacarero M.A.` (Carcaño y Livore, 1991). En el año 1940 se creó una nueva Estación Experimental en La Plata, provincia de Buenos Aires, que desarrolló algunas variedades que fueron sembradas, principalmente, en la provincia de Entre Ríos (Martínez et al., 2014).

En 1950 se creó el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) que intensificó y coordinó el trabajo de investigación y mejoramiento genético del arroz a nivel nacional, mediante la creación del Programa Nacional de Arroz, en el que participó la Estación Experimental Regional Agropecuaria de Corrientes, Estación Experimental Agropecuaria de Concepción del Uruguay (Entre Ríos) y la Estación Experimental de Arroz de la Facultad de Agronomía de La Plata (Buenos Aires), a través del Convenio INTA-Facultad de Agronomía de La Plata (Carcaño y Livore, 1991). En este período se inició la producción de variedades de grano largo que empezaron a reemplazar, gradualmente, a las variedades de grano corto y medio, producidas anteriormente (Martínez et al., 2014).

Un estudio de germoplasma usado históricamente en los programas de mejoramiento argentino identificó la presencia de arroces tipo *indica*, *japonica* templado y *japonica* tropical, lo cual concuerda con la información de pedigrí que señalaba que casi todas las variedades argentinas tienen un fondo genético de arroz tipo *japonica* (Giarrocco et al., 2007).

Bolivia. El arroz fue introducido a Bolivia entre los siglos XVI y XVII por los misioneros Jesuitas en la localidad de Mojo, en lo que es hoy el norte de La Paz y Cuzco, por los misioneros Franciscanos en el Norte de Santa Cruz, y por los españoles en otras regiones del país (Ortíz y Soliz, 2007).

Los primeros datos estadísticos señalan una producción de arroz de 8,5 t y una superficie sembrada de 8.700 ha en 1941. Esta superficie sembrada y producción son el reflejo de las políticas de fomento implementadas por el Estado, para dinamizar el sector agropecuario a finales de 1930, lo que facilitó la circulación de personas y el comercio entre varias localidades del país (Ortíz y Soliz, 2007).

En Bolivia, la investigación de arroz se inició en 1947, cuando la Corporación Boliviana de Fomento (CBF), en Santa Cruz, recibió la colección de germoplasma de arroz del Servicio Agrícola Interamericano (SAI). Este material fue entregado a la Estación Agrícola de los Llanos, hoy Estación Experimental Agrícola de Saavedra, dependiente del Centro de Investigación Agrícola Tropical

(CIAT). La colección de arroz estaba compuesta de variedades importadas y criollas. La evaluación del germoplasma señaló que las variedades locales presentaron un mayor rendimiento y resistencia a la tendedura, por lo cual algunas de ellas como ´Cateto`, ´Mojito`, ´Palo Colorado`, ´Dorado` y ´90 días Colorado` tuvieron mayor aceptación entre los agricultores. Sin embargo, a partir de la década de 1970, las variedades introducidas, como ´Bluebonnet` y ´Dawn-sel`, empezaron a reemplazar a las variedades criollas por su mayor rendimiento y calidad de grano (Reyes y Candia, 1991).

Figura 12. Primeras siembras de arroz en Sudamérica.

Brasil. En Brasil no se conoce con exactitud el lugar y la fecha de la introducción del arroz. Posiblemente el primer arroz cosechado y consumido por los nativos fue en su forma silvestre, previo a la llegada de los portugueses a Brasil (Lee, 1960). Una información señala que, probablemente, fue introducido a Brasil por la flota de Pedro Álvares Cabral, pero la presencia del cultivo sólo se habría informado después de 1530 a la capitanía de São Vicente (Camargo y Matsunaga, 2012). Otra información señala que las primeras siembras de arroz se realizaron en Bahía, en el siglo XVI, con semilla proveniente de las Islas de Cabo Verde, en pequeñas superficies alrededor de las plantaciones de azúcar donde trabajaban los esclavos, quienes poseían la experiencia del manejo del cultivo, la tecnología de la cosecha y el procesamiento del grano (Carney, 2004).

Posterior a su introducción, el cultivo de arroz adquirió una mayor importancia, asociado a la expansión de las plantaciones de caña de azúcar en el noreste de Brasil, llegando a constituirse, en 1618, en el segundo alimento después de la yuca (Carney, 2004). Es así como, los colonizadores portugueses comenzaron a cultivar arroz en suelos de secano en las áreas en Maranhão (1745), Pernambuco (1750), Pará (1772), Bahía (1857) y Pelotas, Río Grande do Sul (1893).

En 1750, la política económica portuguesa estimuló el cultivo y la exportación de arroz en Brasil, como una manera de reducir su dependencia de Carolina del Sur. Esta situación llevó a establecer,

en 1760, el cultivo de arroz de riego en el Estado amazónico de Pará y Maranhão, similar al sistema utilizado en Carolina del Sur. Para ello fueron llevados esclavos con experiencia en el cultivo de arroz desde Guinea-Bissau y se instalaron los primeros molinos propulsados por agua. Todo ello permitió a la región de Maranhão convertirse en la región líder en la exportación de arroz entre 1760 y 1778 (Carney, 1998; 2001a; 2001b). En 1904 se introdujo el arroz bajo riego en la localidad de Pelotas y, a partir de 1912, la superficie con arroz regado aumentó progresivamente asociado al uso de las nuevas tecnologías de riego (Camargo y Matsunaga, 2012).

Es muy posible que las primeras siembras de arroz hayan sido con arroz africano (*O. glaberrima*) en la zona amazónica, el que no poseía una buena calidad. Como una manera de mejorar la producción y calidad del arroz producido en la zona, en 1766 se introdujo la variedad ´Carolina White` desde U.S.A. y en 1772 se prohibió la producción de las variedades locales, en favor de variedades importadas, con una fuerte oposición de los agricultores brasileños (Carney, 2004). Las exportaciones de arroz hacia Portugal aumentaron rápidamente desde 3,3 t en el año 1767 a 5.500 t en el año 1806 (Carney, 1998; 2004).

Después de la independencia de Brasil, la exportación de arroz a Portugal se redujo considerablemente, empezando a tomar mayor importancia como un alimento básico en la dieta de la población brasileña. Es así como, en algunas zonas de Brasil, se empezó a observar siembras de arroz asociadas a otros cultivos, por ejemplo, en plantaciones jóvenes de café, como una manera de obtener alimentos para el autoconsumo y algunos recursos antes de la entrada en producción de estas plantaciones (Platt, 1935).

En 1920, el área cultivada con arroz en el Estado de Santa-Catalina era aproximadamente de 16.500 ha y con una producción de unas 38.000 t. La producción de arroz era realizada, principalmente, por agricultores pequeños (5 ha) y un reducido número de agricultores con mayores superficies que también eran industriales. La zona de producción del arroz en este Estado se realizaba en la zona costera, en un área entre el océano y la cordillera costera y a 150 m s.n.m. y en una zona interior, hasta los 750 m s.n.m. donde se aprovechaba la abundante precipitación y la buena temperatura para la producción (Peixoto, 1925).

Las actividades realizadas para el cultivo del arroz dependían, principalmente, del tipo de suelo. Así, en suelos pantanosos sólo se cortaba la maleza y posteriormente se realizaba la siembra. En suelos con matorrales se cortaba y quemaba la vegetación y luego se realizaba la siembra. Sin embargo, en suelos de riego (´arroxeiras`) de propiedad de colonos alemanes, italianos y rusos, se utilizaba una mayor tecnología (Peixoto, 1925).

La siembra en suelos de riego incluía preparación de suelos, utilizando animales o maquinaria, confección de canales y pretiles para el manejo del agua y tres alternativas de siembra: al voleo, mateado y mecanizado. La siembra al voleo se realizaba en siembras en suelo inundados, el mateado (golpes) en suelo de secano, en el cual una caña con punta realizaba un hoyo en el suelo donde se depositaban seis a 10 semillas; y la mecanizada que utilizaba una máquina tipo ´Planet`. La siembra se realizaba a una distancia entre hileras de 25 a 45 cm y con una dosis de semillas de 90 a 40 kg $ha^{-1}$, en siembras al voleo y mecanizada, respectivamente. Las principales variedades utilizadas eran ´Agulha` (largo-fino), ´Carolina`, ´Dourado`, ´Japonés` (corto-redondo), ´Honduras` (largo-fino); ´Mattâo` (grande), ´Catèto`, ´Catetinho` (cateto pequeño), entre otras. El control de malezas se realizaba con machetes en siembras en suelo inundado y por golpes con palas o en forma manual en las siembras mecanizadas.

En el arroz inundado se iniciaba el riego cuando las plantas tenían entre 15 y 20 cm de altura, el que se incrementaba gradualmente hasta el llenado del grano. Un mes antes de la cosecha se drenaban los campos para facilitar la cosecha. La cosecha del arroz se realizaba en forma manual, utilizando una echona o una pequeña navaja o cuchillo. Con la echona se cortaba la planta en la base, mientras que el cuchillo cortaba sólo la panícula. El secado se realizaba al aire

libre. La producción promedio era de 3.200 y 2.000 kg ha^{-1}, en sistemas de siembra de riego y secano, respectivamente (Peixoto, 1925).

Las primeras actividades de mejoramiento genético de arroz en Brasil empezaron en 1936 en el Instituto Agronómico de Campinas (IAC), donde se realizaron los primeros ensayos de variedades. En 1938 se inició un programa de hibridaciones entre el material introducido y el nacional (Viegas et al., 1945; Brondani et al., 2006) y se creó el Instituto Río Grandense de Arroz (IRGA), donde se empezó a trabajar en el mejoramiento genético de arroz de riego (Soares et al., 2004). Con posterioridad a 1970 se iniciaron nuevos programas de mejoramiento a nivel federal y estatal, lo que logró el desarrollo de un gran número de variedades y un aumento importante en la productividad del cultivo (de Souza et al., 2007; Breseghello et al., 2011), aunque muchas de ellas poseen una base genética estrecha (Cuevas-Pérez et al., 1992; Rabelo et al., 2015).

Colombia. Las primeras siembras de arroz en Colombia se realizaron en el Valle del Magdalena en el año 1580, en el área de Mariquita, hoy parte del Departamento de Tolima (Leurquin, 1967; Balcázar et al., 1980; Spijkers, 1983). En sus comienzos, el cultivo de arroz de secano fue muy precario, pues no se realizaba ninguna práctica cultural entre siembra y cosecha, donde los arroces de Cunday, de las lomas de Mariquita y del valle de San Juan, fueron famosos por la calidad del arroz producido (Leurquin, 1967; Balcázar et al., 1980). En esa época se cultivaba el arroz en asociación con maíz en la parte alta del río Magdalena (Balcázar et al., 1980).

En 1928 el cultivo de arroz se realizaba en el bajo Atrato, en la costa del Pacífico, el que se extendió posteriormente a los municipios de Armero, Venadillo, Alvarado y Mariquita en Tolima, y Campo Alegre, Huila (Fedearroz, 2017). En la región de la costa norte, el cultivo estuvo asociado a la expansión de la ganadería bajo el sistema de ´colonización` que permitió también la expansión de la frontera agrícola (Leurquin, 1967; Balcázar et al., 1980; Spijkers, 1983). El nombre de ´colonización` proviene de la ´Colonia`, una penitenciaría que mantenía presos enviados desde Bogotá para su reeducación y que trabajaban en actividades agrícolas, como el corte de árboles, quema de vegetación y siembra de cultivos (Leurquin, 1967).

El desarrollo de la producción de arroz en la costa norte fue casi exclusivamente de secano, con uso de escasa tecnología. La semilla se introdujo probablemente al Departamento del Chocó desde Cartagena. Hacia 1934, el 50 % de la producción de arroz del país provenía de la costa norte (Balcázar et al., 1980). Este importante aumento de la producción se logró gracias al mejoramiento del transporte fluvial y al establecimiento de pequeños molinos por el gobierno (Leurquin, 1967). En 1948 se inicia el cultivo de arroz de riego mecanizado en la región de Los Llanos, en las sabanas entre los ríos Pajure y Guaruribe, donde se utilizaron las variedades ´Monolaya`, ´Fortune` y ´Bluebonnet` (Balcázar et al., 1980).

Desde comienzos del siglo XVII se sembraba arroz también en la zona de Santa Fe de Antioquia y en Cáceres (Patiño, 1969). La producción de arroz de riego se ubicaba, principalmente, en San Jerónimo y en las llanuras de Sopetrán, sobre el río Aburrá y las de secano en Valdivia y Amalfi (Patiño, 1969). Uno de los factores que facilitó el auge del cultivo del arroz fue el bajo costo del transporte en los departamentos de Bolívar, Córdoba y Antioquia. En esta área se llegó a producir una parte importante del arroz nacional en la década de 1930. La mayor producción se transportaba en barcos a través de los ríos Manangué, Barranquilla y Cartagena (Leurquin, 1967).

Hasta principios del siglo XVIII, el cultivo del arroz no fue importante para la población colombiana. Sin embargo, a partir de la segunda parte de este siglo, el cultivo de arroz empezó a tomar una mayor importancia debido a la migración de la población desde las zonas altas, más densamente pobladas, a las regiones tropicales más bajas y menos pobladas (Spijkers, 1983).

Las primeras siembras de arroz se remontan al año 1577 y se empieza a producir arroz en la parte sur del Valle del Cauca, donde las grandes haciendas ganaderas incluyen pequeñas

superficies de siembra (Spijkers, 1983). A mediados del siglo XIX se realizan las primeras siembras comerciales de arroz de riego en la región de Guacarí, en asociación con el sistema ganadero (Patiño, 1969). Bajo este sistema de producción, el cultivo de arroz de riego se iniciaba con la inundación del terreno y la introducción de animales que comían el pasto natural y pisoteaban el suelo. Posteriormente se retiraban los animales y se realizaba la siembra al voleo en forma manual, en dos fechas de siembra: abril a mayo y septiembre a octubre. Durante el desarrollo del cultivo se realizaban riegos hasta poco antes de la cosecha y el control de malezas se realizaba en forma manual, al igual que la cosecha y la trilla. Una vez terminaba la cosecha, se iniciaba el segundo ciclo de siembra y cosecha del arroz (Balcázar et al., 1980).

La primera variedad usada en el Valle del Cauca fue ´Guacarí`, nombre del municipio y centro de la producción de arroz. La variedad ´Guacarí` fue una selección del tipo ´Honduras` que mantuvo su liderazgo hasta 1930, donde se introdujo la variedad ´Guayaquil` desde Ecuador. Otras variedades sembradas en la época fueron ´Japonés` y ´Bomba`. En 1930 se iniciaron las primeras actividades del Centro Nacional de Investigaciones Agrícolas, en Palmira, el que contribuyó con la introducción de nuevas variedades desde U.S.A., como ´Fortuna`, ´Bluebonnet 50` y ´Zenith` (Balcázar et al., 1980).

En 1934, la mitad de la producción nacional se realizaba en tres departamentos en la costa norte, donde se cultivaba el arroz de pantano (Leurquin, 1967). A finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX, el arroz era bien conocido a través de Colombia, llegando a convertirse en un alimento básico en las zonas tropicales, incluso en algunos grupos nativos, incorporados a la sociedad colombiana como los Cuna, Piapoco, Embera, Huanana y Guahibo (Spijkers, 1983).

Hasta mediados del siglo XX hubo un escaso apoyo de los gobiernos de Colombia a la agricultura, hasta la creación del Ministerio de Agricultura, en 1948. En los primeros años, la investigación y la extensión del arroz en Colombia fue realizada por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Fedearroz y el programa de arroz del CIAT (Spijkers, 1983).

Ecuador. Aparentemente, la producción de arroz tiene sus inicios en la primera mitad del siglo XVIII, aunque su actividad puede ser más antigua (Patiño, 1969). Las primeras siembras de arroz se desarrollaron en las provincias de Guayas, Manabí y Esmeraldas, desde donde se extendió a la región de la Sierra. En el año 1895 se empezó a sembrar arroz en las localidades de Daule, Naranjito y Milagro (Guayas) (CEPAL, 1954).

En sus comienzos, el consumo del arroz no fue importante para la dieta ni la economía de la población ecuatoriana. Sin embargo, su producción tuvo una notable expansión durante la década de 1930, lo que se vio reflejado en el aumento de la superficie sembrada y su nivel de participación en el comercio exportador del país (CEPAL, 1954). Esta situación fue el resultado del aumento de la demanda y del precio internacional, como también de la disponibilidad de suelos para aumentar la superficie sembrada, y las políticas de protección y de estímulo del Estado (CEPAL, 1954).

Paraguay. El cultivo del arroz en Paraguay fue introducido por los misioneros Jesuitas en el siglo XVIII, alrededor de 1750. En sus comienzos, el arroz se sembraba en forma manual, en hileras y depositando varias semillas en un hoyo. La cosecha se realizaba a medida que las plantas iban madurando. El rendimiento obtenido era de, aproximadamente, 20 veces la cantidad del grano sembrado. La trilla se realizaba golpeando las panojas en morteros de madera. El grano cosechado poseía una cubierta epitelial roja amarronada con un sabor agradable y fuerte (Rengger, 2010).

A partir del año 1917, el arroz empezó a adquirir una mayor importancia, llegando gradualmente a satisfacer las necesidades del país en 1941. La superficie sembrada entre 1956 y 1970 fue de alrededor de 10 mil ha, con un rendimiento promedio de 2,3 t ha^{-1} (da Costa, 1971).

La tecnología utilizada era muy precaria, las principales variedades sembradas eran ´Blue Rose`, ´Zenith`, ´Japonés`, ´Bluebonnet 50`, y poseían una mala calidad, con presencia de grano rojo (10 % - 15 %), mezcla mecánica de variedades y bajo poder de germinación. Se estimaba que sólo 10 % de los agricultores usaba semilla de buena calidad. El sistema de siembra era al voleo, con una dosis de semilla de entre 100 y 150 kg ha^{-1}, sin aplicación de fertilizantes y un sistema de riego intermitente. Las principales enfermedades eran *Pyricularia oryzae*, *Helminthosporium oryzae* y *Sclerotium oryzae*. La cosecha se realizaba en forma manual y el arroz cortado era dejado sobre el rastrojo por 48 a 96 h para su secado. Posteriormente, las gavillas eran transportadas en trineos de madera, tirados por bueyes hasta las trilladoras (da Costa, 1971).

Perú. El arroz fue introducido a Perú por los españoles en la segunda mitad del siglo XVI, localizándose las primeras siembras en los valles costeros del sur del país, como Chicama y Moche, alrededor de 1550, y en el Valle de Cañete en 1570 (Prochazka, 1988). En la mitad del siglo XVII, el arroz se cultivaba en Pacasmayo y desde la localidad de Saña se transportaba el arroz a Panamá. En la segunda mitad del siglo XVIII se enviaba el arroz desde Trujillo a Lima (Patiño, 1969).

Durante el Virreinato de Lima y en los primeros tiempos de la República, el arroz permaneció como un cultivo secundario, pero a partir de los años 1860-1870, el cultivo empezó a adquirir mayor importancia como alimento básico de la población peruana, lo que coincidió con la llegada de los inmigrantes chinos o ´coolies` que vinieron a reemplazar a los esclavos en las labores agrícolas. En 1865 el consumo de arroz era de 20.000 t, de las cuales un 70 % eran producidas en el país (Prochazka, 1988).

En sus comienzos, la producción de arroz fue escasa y de mala calidad, ya que se usaban variedades antiguas y escasa tecnología en la producción y en el proceso industrial. Las primeras variedades sembradas en Perú fueron ´Estaquilla` y el arroz ´Chino Colorado'. Posteriormente, se sembraron variedades de mejor calidad como ´Chino Blanco', ´Carolino Dorado', ´Honduras', ´Java Barba Azul', ´Gigante', ´Vialone', ´Blue Rose` y ´Español` (Montero, 1930; Prochazka, 1988). En 1923 la producción de arroz en Perú era de 31.000 t, la que llegó a 56.000 t en 1929 (Montero, 1930).

En 1927 se creó la Estación Experimental Agronómica de Lambayeque en la principal zona productora de arroz, dando comienzo al mejoramiento genético y a la producción de nuevas variedades y tecnologías de producción (Prochazka, 1988; Rimache, 2008). En 1930 el arroz pasó a ser el tercer cultivo en importancia de la costa peruana, después de la caña de azúcar y el algodón. Se cultivaba, principalmente, en los departamentos de Lambayeque y Libertad, y en pequeñas cantidades en el departamento de Arequipa. Posteriormente, el cultivo se extendió a los departamentos de Piura, Ancash, Lima y Tumbes (Montero, 1930).

La Estación Experimental Agropecuaria de Lambayeque empezó su trabajo con la introducción y evaluación de germoplasma de Asia y Norte América, y en el año 1943 inició un programa de cruzamientos que dio lugar a la variedad ´Minabir 2', liberada en 1953, y ´EAL 60` liberada en 1960. En 1966 se introdujo ´IR8', la primera variedad *indica* semi-enana producida por el IRRI, la que fue adoptada rápidamente por los agricultores (Martínez et al., 2014). En 1968 se formó el Programa Nacional de Arroz (Rimache, 2008) que inició el desarrollo de variedades locales como ´Chancay` y ´Naylamp` (Martínez et al., 2014).

Uruguay. El arroz se encuentra presente en Uruguay desde fines del siglo XVIII. Entre los principales hechos históricos que marcan el desarrollo del cultivo en Uruguay se pueden mencionar los siguientes: primeros ensayos realizados en 1869; establecimiento de la primera siembra de arroz en Santa Rosa de Cuareim (hoy Bella Unión) en 1890; establecimiento de un pequeño arrozal en Tranqueras (Departamento de Rivera) en 1912; cultivo de arroz en Juanicó, departamento de Canelones en 1913; ensayo de arroz por la Facultad de Agronomía, Sayago, Montevideo, en 1915; cultivo de arroz en el Departamento de Maldonado en 1919; establecimiento del primer campo

arrocero en Paysandú en 1926; establecimiento de las primeras industrias arroceras en la zona este, Laguna Merín, en 1927; y la formación de varias organizaciones de productores de arroz (CIPA S.A. y Arrozal 33 S.A.) entre 1930 a 1935 en la cuenca del lago Merín (Asociación de Cultivadores de Arroz, ACA, 2019).

Los primeros datos estadísticos sobre la producción de arroz en Uruguay indican una superficie sembrada de arroz de 390 ha en la temporada 1930/1931, con un rendimiento promedio de 2,2 t ha^{-1}. Esta superficie sembrada aumentó a 19.794 ha en 1954 (Posada, 1992).

Venezuela. La introducción del arroz a Venezuela ocurrió en el siglo XVI (Patiño, 1969) y muy probablemente desde la isla La Española (Ortiz y López, 2012). Durante el siglo XVIII, se sembraba arroz en Urama, Nirgua y San Miguel de Acarigua de los Coyones y en las haciendas de los jesuitas (Patiño, 1969).

En el período 1931-1943 se realizaron varias campañas de fomento del cultivo, como supresión de las importaciones del arroz y distribución de semillas a los agricultores, instalación de primeros molinos y la fijación de precios mínimos, las que estuvieron acompañadas de programas de extensión destinados a incentivar el uso de tecnología para asegurar la rentabilidad del cultivo (Ortiz y López, 2012).

En 1943, se iniciaron los trabajos de mejoramiento genético en arroz en el Departamento de Ciencias del Instituto Experimental Agrícola y Zootecnia (MAC), cuyo objetivo principal era el desarrollo y liberación de nuevas variedades de alto rendimiento, resistente a enfermedades, ciclo vegetativo corto a intermedio (menor a 170 d) y buena calidad de grano (Pieters et al., 2011). Las variedades más sembradas en aquella época eran ´Zenith` y ´Blue Bonnet` (Ortíz y López, 2012). En 1946, se creó la Corporación Venezolana de Fomento (CVF) y en 1949 se inició el Plan Arrocero que incluía la coordinación del trabajo de varias instituciones como el Banco Agrícola y Pecuario, molinos, servicios de investigación, asistencia técnica, de extensión del MAC y los agricultores. A partir de 1953 se inició una mayor explotación comercial del cultivo del arroz, apoyado por un plan arrocero desarrollado en la colonia agrícola de Turén, Estado de Portuguesa (Páez, 2004).

En los Llanos Occidentales se pueden identificar un par de hitos importantes en la producción de arroz. Primero, la incorporación de variedades importadas como ´Blue-Bonnet 50`, entre 1949 y 1979, y segundo la incorporación del riego a principios de 1960 (Páez, 2004). En la zona central, el incentivo del riego, en el año 1957 para mejorar la producción ganadero, contribuyó también a aumentar la producción y a la incorporación de nuevas variedades más competitivas como ´Blue-Bonnet 50`, ´Zenith`, ´Rexoro` que reemplazaron a las variedades locales como ´Chollet` y ´Llanero 501` (Páez, 2004).

En los últimos 50 años, el desarrollo de nuevas variedades ha permitido un aumento del rendimiento de 32 %, asociado, principalmente, a una mayor tolerancia a las enfermedades (Pieters et al., 2011). Los análisis de diversidad genética realizados en el germoplasma venezolano de arroz señalan la presencia de una estrecha base genética de las variedades desarrolladas hasta ahora (Acevedo et al., 2007; Herrera et al., 2008).

Guyanas. El arroz ha sido cultivado por varios siglos en las Guyanas (Guyana, Surinam y Guyana Francesa). Sus inicios se remontan al siglo XVII y XVIII, cuando los dueños de las plantaciones azucareras importaban arroz de U.S.A. y África Occidental, como alimento para los esclavos (van Andel et al., 2016). En esta época se sembraba arroz de secano en pequeñas superficies y en los alrededores de las plantaciones, pues estaba prohibido a los esclavos sembrar arroz en superficies mayores. Cuando los esclavos (cimarrones) escaparon de las plantaciones, empezaron a sembrar arroz en sus comunidades en las orillas de los ríos, y en los suelos de los bosques interiores de Guyana, Surinam y Guyana Francesa. Este tipo de actividades permitieron mantener una amplia diversidad genética de variedades antiguas, a pesar de la introducción de variedades más

modernas a partir de 1940 (van Andel, 2010; van Andel et al., 2019). El cultivo de arroz comercial en las Guayanas empezó a comienzos de 1900, en los pantanos de la costa de Guyana y Surinam (van Andel et al., 2019).

Surinam. El desarrollo del cultivo de arroz en Surinam estuvo asociado a tres eventos que marcaron a la sociedad: 1) al comercio de esclavos que ocurrió entre los siglos XVIII y XIX, cuando el arroz era cultivado principalmente para el autoconsumo y en pequeñas superficies por esclavos, pues estaba prohibida su siembra en grandes plantaciones hasta 1800 - 1810; 2) a la llegada de trabajadores asiáticos, desde India y Java, reclutados en las islas británicas y holandesas a finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, para realizar la producción comercial destinada al mercado nacional e internacional; y 3) a la revolución verde, en la segunda mitad del siglo XX, que desarrolló nuevas variedades y tecnologías. Cada uno de estos episodios impactó en el origen de las variedades que llegaron y que se empezaron a cultivar en Surinam, así como el uso de nuevas tecnologías y formas de producción y, finalmente, en la economía del país (Maat y van Andel, 2018).

Consideraciones finales

El arroz *japonica*, después de su domesticación en el sur de China, se difundió a los diferentes continentes, hacia el norte y sur de China, desde donde se difundió a Corea, Japón y el Sudeste de Asia. Posteriormente, esta difusión continuó a Europa, Australia y América. En América el arroz llegó en forma independiente a U.S.A. y Brasil. En este proceso de introducción del arroz al continente americano, tuvo una gran influencia el comercio de esclavos y la presencia de los colonizadores ingleses, portugueses y españoles.

Referencias

Acabado, S., Martin, M., Lauer, A. 2014. Rethinking history, conserving heritage: archaeology and community engagement in IFUAGO, Philippines. The SAA Archaeol. Record 12-17.

Acevedo, M., Torres, E., Moreno, O., et al. 2007. Base genética de los cultivares de arroz de riego liberados en Venezuela. Agron. Trop. 57:197-204.

Adanir, F. 1989. Tradition and rural change in Southeastern Europe during Ottoman rule. p. 131-176. In Chirot, D. (ed.) The origins of Backwardness in Eastern Europe. University of California Press, Los Angeles, California, USA.

Adshead, S. 1997. Material culture in Europe and China. 1400-1800. McMillan Press, London, UK.

Agrama, A., Yan, W., Jia, M., et al. 2010. Genetic structure associated with diversity and geographic distribution in the USDA rice world collection. Nat. Sci. 2:247-291.

Ahn, S. 2010. The emergence of rice agriculture in Korea: archaeobotanical perspectives. Archaeol. Anthropol. Sci. 2:89-98.

Allonte, G. 1997. Rice production and consumption in Roumania. In Chataigner. J. (ed.) Activités de recherche sur le riz en climat méditerranéen. CIHEAM, Montpelier, France. Cah. Options Mediterr. 24(2):153-155.

Alvarez, A., Fuentes, J., Puldón, V., et al. 2007. Genetic diversity analysis of Cuban traditional rice (*Oryza sativa* L.) varieties based on microsatellite markers. Genet. Mol. Biol. 30:1109-1117.

Artiga, S. 1970. Situación actual del arroz en El Salvador. En Montoya, L. (Coord.) Reunión técnica sobre programación de la investigación y extensión agrícola en arroz para América Central. Vol. 1. Panamá, 21-25 septiembre. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), San José, Costa Rica.

Asociación de Cultivadores de Arroz (ACA). 2019. http://www.aca.com.uy/wp-content/uploads/2014/07/Historia-del-Arroz-en-Uruguay.pdf.

Badura, M., Mozejko, B., Swieta-Musznicka, J., et al. 2015. The comparison of archaeobotanical data and the oldest documentary records (14th-15th century) of useful plants in medieval Gdańsk, northern Poland. Veget. Hist. Archaeobot. 24:441-454.

Baeta, J. 1997. Production et consommation du riz au Portugal. In Chataigner, J. (ed.) Activités de recherche sur le riz en climat méditerranéen. CIHEAM, Montpelier, France. Cah. Options Mediterr. 24:151-152.

Balcázar, A., Marulenda, O., Rojas, H., et al. 1980. Estructura y organización de la producción de arroz en Colombia. In Cambio técnico en la producción de arroz en Colombia 1950-1979. Proyecto Cooperativo de Investigación sobre Tecnología Agropecuaria en América Latina (PROTAAL), Oficina de Investigaciones Socioeconómicas y Legales (OFISEL), Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas-OEA, Bogotá, Colombia.

Bale, M. 2011. The archaeology of early agriculture in the Korean Peninsula: an update on recent developments. Indo-Pacific prehistory Association Bull 21:77-84.

Ballesteros, R. 1997. Rice production and research in Spain. In Chataigner, J. (ed.) Activités de recherche sur le riz en climat méditerranéen. CIHEAM, Montpelier, France. Cah. Options Mediterr. 24:161-164.

Beaux, J. 1975. La culture du riz en Camargue, aspects techniques et commerciaux actuels. Méditerranée. https://www.persee.fr/issue/medit_0025-8296_1975_num_22_3?sectionId=medit_0025-8296_1975_num_22_3_1622:53-68.

Bellwood, P. 1997. Prehistory of the Indo-Malaysian Archipielago. 2nd Edition. Honolulu. Univ. Hawaii Press.

Bellwood, P. 2011a. Holocene population history in the Pacific region as a model for worldwide food producer dispersals. Curr. Anthropol. 52(S4):S363-S377.

Bellwood, P. 2011b. The Checkered prehistory of rice movements southwards as a domesticated cereal-from the Yangtze to the Equator. Rice 4:93-103.

Bellwood, P., Dizon, E. 2005. The Batanes archaeological project and the ´Out of Taiwan` hypothesis for Austronesian dispersal. J. Austron. Stud. 1:1-33.

Bellwood, P., Gillespie, R., Thompsom, G., et al. 1992. New dates for prehistoric Asian rice. Asian Persp. 31:161-170.

Bellwood, P., Oxenham, M., Bui, C., et al. 2011. An Son and the Neolithic of Southern Vietnam. Asian Perspect. 50:144-174.

Benes, J., Čultíková, V., Kosňovská, J., et al. 2012. New plants at Prague Castle and Hradčany in the Early Modern Period: a history of selected species. IANSA 3:103-114.

Benítez, F. 1989. La Nao de China. 183 p. Ed. Cal y Arena, México D.F.

Benoliel, B. 1928. La Riziculture en Portugal. Riz et Riziculture 3:137-160.

Berleant, R. 2012. Beans, peas, and rice in the Eastern Caribbean. p. 81-100. In Wilk, R., Barbosa, L. (eds.) Rice and beans: a unique dish in hundred places. Publisher Berg. doi:10.13140/2.1.25730244.

Bourke, R. 2009: History of Agriculture in Papua New Guinea. p. 10-26. In Bourke, R., Harwood, T. (eds.) Food and agriculture in Papua New Guinea. ANU Press, 2009. http://www.jstor.org/stable/j.ctt24h987.12.

Boyadjiev, P. 1996. Rice production in Bulgaria. In Chataigner, J. (ed.) Activités de recherché sur le riz en climat méditerranéen. CIHEAM, Montpelier, France. Cah. Options Méditerr. 24(2):15-29

Breseghello, F., Morais, O., Pinheiro, P., et al. 2011. Results of 25 years of upland rice breeding in Brazil. Crop Sci. 51:914-923.

Brjezitsky, M. 1928. Le riz en URSS. Riz et Riziculture 3:57-69.

Brjezitsky, M. 1933. Extension de la culture du riz vers le north de l´URSS. Riz et Riziculture 7: 177-181.

Brondani, C., Oliveira, T., Rangel, P., et al. 2006. Determination of genetic variability of traditional varieties of Brazilian rice using microsatellite markers. Gen. Mol. Biol. 29:676-684.

Cabezas, E., Espinoza, A. 2000. El arroz en América: su introducción y primeras siembras. Rev. Hist. Amer. 26:7-18.

Cai, X., Fan, J., Jiang, Z., et al. 2013. The puzzle of Italian rice origin and evolution: determining genetic divergence and affinity of rice germplasm from Italy and Asia. PLoS ONE 8:e80351.

Caimo, R. 2019. L'importanza delle varietà locali e delle cultivar obsolete per l'agricoltura biologica: l'esempio del riso. p. 144-146. In Rossi, G., Guzzon, F., Canella, M. et al. (eds.) Le varietà agronomiche lombarde tradizionali a rischio di estinzione o di erosione genetica Ortive e cerealicole: uno sguardo d'insieme. 174 p. Pavia Univ. Press. Edizioni dell'Università degli Studi di Pavia, Italy.

Calatayud, S. 2002. Tierras inundadas. El cultivo del arroz en la España contemporánea (1800-1936). Rev. Hist. Econ. 1:39-80.

Camargo, A., Matsunaga, E. 2012. El mercado de arroz en Brasil. p. 41-55. En El mercado de arroz en los países del CAAS. Grupo Técnico 2. Sistemas de Información de Mercados y Pronósticos de Cosecha Red de Políticas Agropecuarias (REDPA) Consejo Agropecuario del Sur (CAS).

Carcaño, D., Livore, A. 1991. Mejoramiento del arroz en la Argentina. p. 5-18. En Puignau, J.P. (ed.) Mejoramiento del arroz. Dialogo XXXIII. Programa Cooperativo para El Desarrollo Tecnológico Agropecuaria del Cono Sur, PROCISUR, IICA, Montevideo, Uruguay.

Carney, J. 1998. The role of African rice and slaves in the history of rice cultivation in the Americas. Human Ecol. 26:525-545.

Carney, J. 2001a. Blackrice: The African origins of rice cultivation in the Americas. Cambridge MA. Harvard University Press.

Carney, J. 2001b. African rice in the Columbian exchange. J. Afric. Hist. 42:377-396.

Carney, J. 2003. The African antecedents of Uncle Ben in U.S. rice history. J. Hist. Geogr. 29:1-21.

Carney, J. 2004. With grains in her hair: rice in colonial Brazil. Slav. Abol. 25:1-27.

Carney, J. 2011. West Africa and the origin of Mexican rice cultivation and rice gastronomy. http://3africanastudies.blogspot.com/2011/02/west-africa-and-origin-of-mexican- rice.html

Castillo, C. 2011. Rice in Thailand: the archaeobotanical contribution. Rice 4:114-120.

Castillo, C. 2014. The rice remains from Temmanggung: first evidence of tropical *japonica* in Indonesia. p. 267-278. In Abbas, N. (ed.) Liangan: Mozaik Peradaban Mataram Kuno di Lereng Sindoro. Kepel Press, Yogyakarta, Indonesia.

Castillo, C. 2017. Development of cereal agriculture in prehistoric mainland Southeast Asia. Man India 97:335-352.

Castillo, C. 2018. The archaeology of Khao Sek. Archaeol. Res. Asia. 13:74-77.

Castillo, C., Bellina, B., Fuller, D. 2016a. Rice, beans and trade crops on the early maritime silk route in Southeast Asia. Antiquity 90:1255-1269.

Castillo, C., Fuller, D. 2010. Still too fragmentary and dependent upon chance? Advances in the study of early Southern Asian archaeobotany. In Bellina-Pryce, B., Pryce, T.O., Bacus, E., et al. (eds.) 50 years of archaeology in Southeast Asia: Assays in honor of Ian Glover. River Books, Bangkok.

Castillo, C., Fuller, D., Piper, P. 2017. Hunter-gather specialization in the Late Neolithic of Southern Vietnam-The case of Rach Nui. Quat. Int. 489:63-79.

Castillo, C., Higham, C., Miller, K., et al. 2018a. Social response to climate change in Iron Age northeast Thailand: new archaeobotanical evidence. Antiquity 92:1274-1291.

Castillo, C., Polkinghorne, M., Vincent, B., et al. 2018b. Life goes on: Archaeobotanical investigations of diet and ritual at Angkor Thom, Cambodia (14th-15th centuries CE). The Holocene 28:930-944.

Castillo, C., Tanaka, K., Sato, Y., et al. 2016b. Archaeogenetic study of prehistoric rice remains from Thailand and India: Evidence of early *japonica* in South and Southeast Asia. Archaeol. Anthropol. Sci. 8:523-543.

CEPAL. 1954. El desarrollo económico del Ecuador (E/CN.12/295). 709 p. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), México. Publicación de la Naciones Unidas, Ministerio de Coordinación de Política Económica, Quito, Ecuador.

Chambliss, C., Adams, E. 1915. The culture of rice in California. Farmers Bulletin N° 688. USDA, USA.

Chataigner, J., Mouret, J. 1997. Recherche et production rizicole en France. In Chataigner, J. (ed.) Activités de recherche sur le riz en climat méditerranéen. CIHEAM, Montpelier, France. Cah. Options Mediterr. 24:117-126.

Choe, C. 1982. The diffusion route and chronology of Korean plant domestication. J. Asian Studies 41: 519-529.

Choe, C., Bale, M. 2002. Current perspectives on settlement, subsistence, and cultivation in prehistoric Korea. Artic Anthropol. 39:96-121.

Choy, K., Richards, M. 2010. Isotopic evidence for diet in the Middle Chulmun period: a case study the Tongsamdong shell midden, Korea. Archaeol. Anthropol. Sci. 2:1-10.

Cobo, J., Fort, J., Isern, N. 2019. The spread of domesticated rice in eastern and southeastern Asia was mainly demic. J. Archaeol. Sci. 101:123-130.

Cömertpay, G., Baloch, F., Derya, M., et al. 2016. Population structure of rice used in Turkish rice breeding programs determined using simple-sequence repeat and inter-primer binding site-retrotransposon data. Genet. Mol. Res. 15:1-14.

Courtois, B., Frouin, J., Greco, R., et al. 2012. Genetic diversity and population structure in a European collection of rice. Crop Sci. 52:1663-1675.

Crawford, 2011. Advances in understanding early agriculture in Japan. Curr. Anthropol. 52: S331-S345.

Crawford, G., Chen, S. 1998. The origins of rice agriculture: recent progress in East Asia. Antiquity 72:858-866.

Crawford, G., Chen, X., Wang, J. 2006. Houli culture rice from the Yuezhuang site, Jinan. East Asia Archaeol. 3:247-251.

Crawford, G., Lee, G. 2003. Agricultural origins in the Korean Peninsula. Antiquity 77:87-95.

Crist, R. 1957. Rice culture in Spain. The Scientific Monthly 84:66-74.

Cuevas-Pérez, F., Gimaraes, E., Berrio, L., et al. 1992. Genetic base of irrigated rice in Latin America and the Caribbean. 1971 to 1989. Crop Sci. 32:1054-1059.

D´Alpoim Guedes, J., Hanson, S., Higham, C., et al. 2019. The wet and the dry, the wild and the cultivated: subsistence and risk management in ancient Central Thailand. Archaeol. Anthropol. Sci. 11:6473-6484.

D´Alpoim Guedes, J., Hanson, S., Lertcharnrit, T., et al. 2020. Three thousand years of farming strategies in Central Thailand. Antiquity 94:966-982.

D´Andrea, A., Crawford, G., Kudo, M. 1995. Late Jomon cultigens in northeastern Japan. Antiquity 69:146-152.

Da Costa, P. 1971. El arroz en el Paraguay. Programa de Investigación. 1971/72-1975/76. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas zona sur, Montevideo, Uruguay.

Dal Martello, R., Min, R., Stevens, C. et al. 2018. Early agriculture at the crossroads of China and Southeast Asia: archaeobotanical evidence and radiocarbon dates from Baiyangcun, Yunnan. J. Archaeol. Sci.: Rep. 20:711-721.

De Souza, M., Morais, O., Herán, R., et al. 2007. Progresso genético do melhoramiento de arroz de terras altas no período de 1950 a 2001. Pesq. Agropec. Bras. Brasilia 42:371-376.

Denham, T. 2011. Early agriculture and plant domestication in New Guinea and Island Southeast Asia. Curr. Anthropol. 52:S379-S395.

Denham, T. 2013. Early farming in Island Southeast Asia: an alternative hypothesis. Antiquity 87:250-257.

Dobby, E. 1938. The Ebro Delta. Geographical J. 87:455-469.

Efferson, J. 1952. Surplus-rice regions of Africa and Europe: Italy. p.258-267. In The production and marketing of rice. The rice Journal. Simmons Press, New Orleans, Louisiana. 550p.

Enrique, R. 1991. Felipe de Jesús, El Santo Criollo. 193 p. Librería Parroquial de Clavería, México, D.F.

Evered, K., Evered, E. 2016. A conquest of rice: agricultural expansion, improvement, and malaria in Turkey. Hist. Agraria 68:103-136.

Faivre-Rampant, O., Bruschi, G., Abbruscato, P., et al. 2011. Assessment to genetic diversity in Italian rice germplasm related to agronomic traits and blast resistance (*Magnaporthe orysae*). Mol. Breed. 27:233-246.

Falvey, J. 2010. History of rice in South East Asia and Australia. p. 183-224. In Sharma, S.D. (ed.) Rice: origin, antiquity and history. CRC Press, Florida, USA. doi:10.1201/EBK1578086801-c7.

Faroqhi, S. 1993. Tarsus and the Tahrir. Osmanli Araştirmalari XIII. J. Ottoman Stud. 13:75-89.

Fedearroz. 2017. Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz). http://www.fedearroz.com.co/new/historiaarroz.php.

Fernández, J., Rondina, J. 2006. Las cuestiones económicas fundamentales. La consolidación del desarrollo ganadero. p. 66-69. En Historia de Argentina. Tomo I (1810-1930). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Fuentes, J., Arteche, J., Suárez, E., et al. 2004. Genetic base and commercial utilization of rice varieties in Cuba. J. Genet. Breed. 58:329-338.

Fuentes, J., Cornide, M., Álvarez, A., et al. 2005. Genetic diversity analysis of rice varieties (*Oryza sativa* L.) based on morphological, pedigree and DNA polymorphisms data. Plant Genet. Res. 3:353-359.

Fuentes, J., Escobar, F., Álvarez, A., et al. 1999. Analysis of genetic diversity in Cuban rice varieties using AFLP, RAPD and isozyme markers. Euphytica 109:107-115.

Fuentes, J., Ramírez, I., Arteche, J., et al. 2003. Genetic base of Cuban rice varieties released between 1972 and 1993. Cultivos Tropicales 24:55-61

Fujino, K., Hirayama, Y., Kaji, R. 2019b. Marker-assisted selection in rice breeding programs in Hokkaido. Breed. Sci. 69:383-392.

Fujino, K., Nishimura, T., Kiuchi, H., et al. 2017. Phenotype changes during 100-year rice breeding programs in Hokkaido. Breed. Sci. 67:528-534.

Fujino, K., Obara, M., Ikegaya, T., et al. 2015. Genetic shift in local rice populations during rice breeding programs in the northern limit of rice cultivation in the world. Theor. Appl. Genet. 128:1739-1746.

Fujino, K., Obara, M., Ikegaya, T. 2019a. Establishment of adaptability to the northern-limit of rice production. Mol. Genet. Genomics 294:729-737.

Fujino, K., Yamanouchi, U., Nonoue, Y., et al. 2019c. Switching genetic effects of the flowering time gene *Hd1* in LD conditions by *Ghd7* and *OsPRR37* in rice. Breed. Sci. 69:127-132.

Fuller, D., Boivin, N., Hoogervorst, T., et al. 2011. Across the Indian Ocean: The prehistoric movement of plants. Antiquity 85:544-558.

Fuller, D., Qin, L. 2009. Water management and labor in the origins and dispersal of Asian rice. World Archaeol. 41:88-111.

Fuller, D., Sato, Y., Castillo, C., et al. 2010. Consilience of genetics and archaeobotany in the entangled history of rice. Archaeol. Antrhropol. Sci. 2:115-131.

Fusón, R. 1958. The savanna of central Panamá: a study in cultural geography. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. LSU Historical Dissertations and Theses. 461. https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_disstheses/461.

Gadal, N., Shrestha, J., Poudel, M.N., et al. 2019. A review on production status and growing environments of rice in Nepal and in the world. Arch. Agric. Environ. Sci. 4:83-87.

Gao, Y., Dong, G., Yang, X., et al. 2020. A review on the spread of prehistoric agriculture from southern China to mainland Southeast Asia. Sci. China Earth Sci. 63:615-625.

Garris, A., Tai, T., Coburn, J., et al. 2005. Genetic structure and diversity in *Oryza sativa* L. Genetics 169:1631-1638.

Geisseler, D., Howarth, W. 2016. Rice production in California. U. de California, Davis. https://apps1.cdfa.ca.gov/FertilizerResearch/docs/Rice_Production_CA.pdf

Giarrocco, L., Marassi, M., Salerno, G. 2007. Assessment of the genetic diversity in Argentine rice cultivars with SSR markers. Crop Sci. 47:853-860.

Helmers, K. 1997. Rice in the Cambodian economy: past and present. In Nesbitt, H.J. (ed.) Rice production in Cambodia. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, Philippines.

Herber, L., Kruger, R., Fontana, M. 2017. El cultivo de arroz en Corrientes. Una producción con historia. En Proyecto arroz. Resultados campaña 2016/2017. INTA Corrientes, Argentina.

Herrera, T., Duque, D., Almeida, I., et al. 2008. Assessment of genetic diversity in Venezuelan rice cultivars using sequence repeats markers. Electron. J. Biotechnol. 11:3-4.

Higham, C. 2004. Mainland Southeast Asia from the Neolithic to the Iron Age. p. 41-67. In Glover, I., Bellwood, P (eds.) Southeast Asia: from prehistory to history. Routledge Curzon, London, UK.

Higham, C. 2014. From the Iron Age to Angkor: new light on the origins of a state. Antiquity 88:822-835.

Higham, C., Douka, K., Higham, T. 2015. A new chronology for the Bronce Age of northeastern Thailand and its implications for Southeast Asia prehistory. PLoS ONE 10(9):e0137542.

Higham, C., Higham, T., Ciarla, R., et al. 2014. The excavation of Non Ban Jak, Northeast Thailand. A report on the first three seasons. J. Indo-Pacific Archaeol. 34:1-41.

Hill, R. 2012. Rice in Malaya: A study in historical geography. NUS Press, Singapore.

Hung, H. 2005. Neolithic interaction between Taiwan and Northern Luzon: the pottery and Jade Evidences from the Cagayan valley. J. Austron. Studies 1:109-133.

Hung, H., Carson, M., Bellwood, P., et al. 2011. The first settlement of remote Oceania: Luzon to the Marianas. Antiquity 85:909-926.

Huong, N. 2017. Burnt rice from four archaeological sites in northern Vietnam. Vietnam Social Sci. 3:64-77.

Hütteroth, W.D. 2006. Ecology of the Ottoman lands. p. 18-43. In Faroqhi, S. (ed.) The Cambridge History of Turkey. Vol. 3. The later Ottoman Empire, 1603-1839. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Inalcik, H. 1994. Settlements. p. 165-163. In Inalcik, H., Quataert, D. (eds.) An economic and social history of the Ottoman Empire. Vol. 1. 1300-1600. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jayamani, P., Negrao, M., Macas, B., et al. 2007. Genetic relatedness of Portuguese rice accessions from diverse origins as assessed by microsatellite markers. Crop Sci. 47:879-886.

Kagawa, M. 1973. Primitive agriculture in Japan: Latest Jomon Agricultural society and means of production. Asian Perspectives 16:1-4.

Kho, S. 1987. Rice cultivation. In Koreans in Soviet Central Asia. Stud. Orient. Electron., Helsinki 61:71-100.

Khush, G. 1997. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. Plant Mol. Biol. 45:25-34.

Kim, M. 1982. Discoveries of rice in prehistoric sites in Korea. J. Asian Studies 41:513-518.

Kim, M. 2014. Rice ethnicity, and the collation of archaeobotanical data for prehistoric Korea. Archaeol. 10:168-193.

Kim, M. 2015. Rice in ancient Korea: status symbol or community food? Antiquity 89:838-853.

Kim, M., Ahn, S., Jeong, Y. 2013. Rice (*Oryza sativa* L.): Seed-size comparison and cultivation in Ancient Korea. Econ. Bot. 67:378-386.

Kim, H., Jeong, E., Ahn, D., et al. 2014. Nuclear and chloroplast diversity and phenotypic distribution of rice (*Oryza sativa* L.) germplasm from the Democratic People´s Republic of Korea (DPRK; North Korea). Rice 7:7.

Kim, M., Oh, R., Bang, M., et al. 2018. Rice and social differentiation on a volcanic island: An archaeobotanical investigation of Yerae-don, Korea. Camb. Archaeol. J. 28:475-491.

King, C., Bentley, R., Higham, C., et al. 2014. Economic change after the agricultural revolution in Southeast Asia? Antiquity 88:112-125.

King, C., Bentley, R., Tayles, N., et al. 2013. Moving peoples, changing diets: isotopic differences highlight migration and subsistence changes in the Upper Min River Valley, Thailand. J. Archaeol. Sci. 40:1681-1688.

Kingwell-Banham., E., Bohingamuwa, W., Perera, N., et al. 2018. Spice and rice: pepper, cloves and everyday cereal foods at the ancient port of Mantai, Sri Lanka. Antiquity 92:1552-1570.

Knapp, S. 1903. Rice. p. 102-109. Papers and Proceedings of the Sixteenth Annual Meeting. Part I. New Orleans, Louisiana. 29-31 December. American Economic Association 3rd Series, Vol. 5, Nr 1. http://www.jstor.org/stable/2999861.

Kovach, M., Calingacion, M., Fitzgerald, M., et al. 2009. The origin and evolution of fragrance in rice (*Oryza sativa* L.). Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106: 14444-14449.

Kumagai, M., Kanehara, M., Shoda, S., et al. 2016. Rice varieties in Arthic East Asia: Reduction of its diversity from past to present times. Mol. Biol. Evol. 33:2496-2505.

Lami, R. 1952. La Culture du Riz en Camargue. Riz et Riziculture 3:25-83.

Laufer, B. 1919. Rice. p. 372-373. In Chinese contribution to the history of civilizations in ancient Iran. Sino-Iranica, Field Museum of Natural History Publication N°201. With special reference to the history of cultivated plants and products. The blackstone expedition. Anthropological Series 25 N°3. Chicago. 628 p.

Lee, J. 2017. Agricultural practice on the Korean Peninsula taking into account the origin of rice agriculture in Asia. Archaeol. Ethonol. Anthropol. Eurasia 45:36-48.

Lee, C. 1960. A culture history of rice with special reference to Louisiana. LSU Historical Dissertations and Theses. 597. https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_disstheses/597.

Lee, G. 2011. The transition from foraging to farming in prehistoric Korea. Curr. Anthropol. 52:S307-S329.

Lee, H., French, C., Macphail, R. 2014. Microscopic examination of ancient and modern irrigated paddy soils in South Korea, with special reference to the formation of silty clay concentration features. Geoarchaeol. 29:326-348.

León, M., Arroyo, M. 2011. Producción, tecnología y comercialización del arroz en Costa Rica. 1950-2005. 133 p. Instituto de Investigaciones en Ciencias Económicas (IICE), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Leurquin, P. 1967. Rice in Colombia, a case study in agricultural development. Food Res. Institute Studies 7(2):217-303.

Livarda, R. 2011. Spicing up life in northwestern Europe: exotic food plant imports in the Roman and Medieval world. Veget. Hist. Archaeobot. 20:143-164.

Lu, H., Redus, M., Coburn, J., et al. 2005. Population structure and breeding patterns of 145 U.S. rice cultivars based on SSR marker analysis. Crop Sci. 45:66-76.

Maat, H., van Andel, T. 2018. The history of the rice gene pool in Surinam: circulation of rice and people from the eighteenth century until late twentieth century. Hist. Agraria 75:69-71.

Mallick, R.N. 1982. Rice in Nepal. Kathmandu. Kala Prakasan.

Mantegazza, R., Biloni, M., Grassi, F., et al. 2008. Temporal trends of variation in Italian rice germplasm over the past two centuries revealed by AFLP and SSR markers. Crop Sci. 48:1832-1840.

Martínez, C., Grenier, C., Lorieux, M., et al. 2014. Rice breeding in Latin America. Plant Breed. Rev. 38:187-276.

Mateo, M.A. 1923. Apuntaciones históricas de Xoxutla a Tlaquiltenango. p. 94-107. Imprenta Victoria, México, D.F.

Mikhailovna, N. 2014. Weather anomalies and the formation of rice yield in the South of the Russian Far East. Adv. Env. Biol. 8: 88-93.

Miller, N. 1981. Plant remain from Ville Royale II, Susa. Cahiers de la Délégation Archéologique Française en Iran 12:137-142.

Miller, N. 2011. An archeobotanical perspective on environment, plant use, agriculture, and interregional contact in South and Western Iran. Iran. J. Archaeol. Stud. 1:1-8.

Miyamoto, K. 2014. The initial spread of early agriculture into Northeast Asia. Asian Archaeol. 3:1-12.

Miyamoto, K. 2016. Archaeological explanation for the diffusion theory of the Japonic and Koreanic languages. Jpn. J. Archaeol. 4:53-75.

Miyamoto, K. 2019. The spread of rice agriculture during the Yayoi period: from the Shandong Peninsula to the Japanese Archipelago via Korean Peninsula. Jpn. J. Archaeol. 6:109-124.

Mongiano, G., Titone, P. Tamborini, L. et al. 2018. Evolutionary trends and phylogenetic association of key morphological traits in the Italian rice varietal landscape. Sci. Rep. 8: 13612.

Montero, L. 1930. El cultivo de arroz en el Perú. Boletín de la Compañía Administradora de Guano 6:577-660.

Murphy, C., Weisskopf, A., Bohingamuwa, W., et al. 2018. Early agriculture in Sri Lanka: New archaeobotanical analyses and radiocarbon dates from the early historic sites of Kirinda and Kantharodai (Kandarodai). Archaeol. Res. Asia 16:88-102.

Muthukumaran, S. 2014. Between archaeology and text: the origins of rice consumption and cultivation in the Middle East and the Mediterranean. Papers from the Institute of the Archaeology 24(1):1-7.

Nelson, S. 1982. The Effects of rice agriculture on prehistoric Korea. J. Asian Studies 41:531-543.

Nesbitt, M. 2010. History of rice in Western and Central Asia. p. 312-344. In Sharma, S. (ed.) Rice: Origin, Antiquity and History. NH Science Publishers, Enfield, New Hampshire, USA.

Norton, C. 2007. Sedentism, territorial circumscription, and the increased use of plant domesticates across Neolithic-Bronze Age Korea. Asian Perspectives 46:133-2165.

Ntanos, D. 1997. Rice production and research in Greece. In Chataigner J. (ed.) Activités de recherche sur le riz en climat méditerranéen. Cah. Options Méditerr. 24:127-133.

Ntanos, D. 2001. Evolution of rice research and production in Greece. Rice Commun. Newsl. 50:43-48.

Oka, H. 1988. *Indica-Japonica* differentiation of rice cultivars. p. 141-179. In Origin of cultivated rice. Developments in crop science 14. Jpn Sci. Soc. Pres. Elsevier N.Y. 254p.

Ortiz, A., López, L. 2012. El cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en Venezuela. p. 86-108. Alcance (Edición especial Dic 2012).

Ortíz, I., Soliz, L. 2007. El arroz en Bolivia. Centro de Investigación y Promoción del Campesinado (CIPCA), Santa Cruz, Bolivia.

Osuna, F.J. 1993. Estudios agronómicos en arroz de trasplante en Morelos. p. 37-51. En Modernización de la tecnología de producción de arroz. Memoria del Seminario INIFAP-JICA. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), Zacatepec, Morelos, México.

Osuna, F.J., Hernández, L., Salcedo, J., et al. 2000. Manual para la producción de arroz en la región Central de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro, México.

Oxenham, M., Piper, P., Bellwood, P., et al. 2015. Emergence and diversification of the Neolithic in Southern Vietnam: insights from Coastal Rach Nui. J. (s) Coastal Archaeol. 10:309-338.

Páez, O. 2004. El cultivo del arroz en Venezuela. Serie Manuales de Cultivo INIA N°1. 202 p. República Bolivariana de Venezuela, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Maracay, Venezuela.

Park, J., Park. J., Yi, S. et al. 2019. Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8.2 ka, 4.2 ka, and 2.8 ka BP events, and societal responses on the Korean peninsula. Sci. Rep. 9:10806.

Parveen, S., Childs, N., Wailes, E., et al. 1994. The US rice industry. Agric. Econ. Rep. Nr AER-700. 162 p. USDA, Economic Research Service, Washington, D.C., USA.

Patiño, V. 1969. Arroz p. 73-83. En Plantas cultivadas y animales domésticos en América Equinoccial. Tomo IV. Plantas Introducidas. 1ª Edición. Cali. Imprenta departamental, Colombia. http://babel.banrepcultural.org/cdm/ref/collection/p17054coll10/id/3197.

Peixoto, A. 1925. La Culture du Riz dans l'Etat de Santa-Catharina (Brasil). Riz et Riziculture 1:255-268.

Piacco, R. 1959. Le prime varietá di riso cultivate in Italia. Il Riso 8:12-13.

Pieters, A. Graterol, E., Reyes, E., et al. 2011. Cincuenta años de mejoramiento genético del arroz en Venezuela. ¿Que se ha logrado? Interciencia 36:943-948.

Platt, R. 1935. Coffee plantations of Brazil: a comparison of occupancy patterns in established and frontiers areas. Geographical Rev. 25:231-239.

Posada, D. 1992. Rice production in Uruguay. Historical analysis. In Cuevas-Pérez, F. (ed.) Improvement, management, and marketing. Proceedings of the International Conference for Latin America and the Caribbean, Villa Hermosa, Tabasco, México, 1991. Publication N°209. 288p. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Premathilake, R. 2006. Relationship of environmental changes in central Sri Lanka to possible prehistoric land-use and climate changes. Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol. 240:468-496.

Premathilake, R., Hunt, C., Parera, N., et al. 2017. Late Pleistocene humans used rice in Sri Lanka: Phytolith investigation of the deposits at Fahein Rock Shelter. Glob. J. Hum. Soc. Sci. 17(2):19-29.

Prochazka, G. 1988. Reseña de la producción y comercialización del arroz en el Perú y propuesta metodológica para evaluar pérdidas poscosecha. Publicación Miscelánea N°A3/PE-88-011. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica.

Pureco, J., García, A. 2017-2018. Del Estado al mercado. La tendencia general de la producción de arroz en México, 1930-2010. Letras Históricas. Universidad de Guadalajara 17:157-183.

Rabelo, H., Guimarães, J., Pinheiro, J., et al. 2015. Genetic base of Brazilian irrigated rice cultivars. Crop Breed. Appl. Biotechnol. 15:146-153.

Rahman, M., Castillo, C., Murphy, C., et al. 2020. Agricultural systems in Bangladesh: the first archaeobotanical results from Early Historic Wari-Bateshwar and Early Medevial Vikrampura. Archaeol. Anthropol. Sci. 12:37.

Rahman, M., Murphy, C., Weisskopf, A., et al. 2019. Wari-Bateshwar and Vikrampura: successful case studies in archaeobotany, Bangladesh. Man Environ. 44(1):62-72.

Reed, K., Leleković, T. 2017. First evidence of rice (*Oryza* cf. *sativa* L.) and black pepper (*Piper nigrum*) in Roman Mursa, Croatia. Archaeol. Antrhopol. Sci. 11:271-278.

Rengger, J. 2010. Viaje al Paraguay en los años 1916 a 1826. Traducción Alfredo Tomasini y José Braunstein. Editorial Tiempo de Historia. Asunción, Paraguay.

Reyes, N. 1970. Situación actual del arroz en Honduras. In Montoya, L. (coord.) Reunión técnica sobre programación de la investigación y extensión agrícola en arroz para América Central. Vol. 1. Panamá. 21-25 septiembre. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), San José, Costa Rica.

Reyes, N., Candia, R. 1991. Mejoramiento de arroz en Santa Cruz-Bolivia. p. 19-27. En Puignau, J.P. (ed.) Mejoramiento del arroz. Diálogo XXXIII. Programa Cooperativo para El Desarrollo Tecnológico Agropecuaria del Cono Sur, PROCISUR, IICA, Montevideo, Uruguay.

Rimache, M. 2008. Cultivo del arroz. Colección de cereales. Empresa Editorial Macro, Miraflores, Perú.

Robertson, C. 1935. Italian rice production in its regional setting. Geography 20:13-27.

Robertson, C. 1938. Agricultural regions of the North Italian Plain. Geographical Rev. 28:573-596.

Romero, G.C. 2000. Breve historia de la Nao de Manila. www.mexicodesconocido.com.mx/mex_tiem/mt980802.htm.

Rosen, A., Chang, C., Grigoriev, P. 2000. Palaeoenvironments and economy of Iron Age Saka-Wusun agro-pastorilists in Southeastern Kazakhstan. Antiquity 74:611-623.

Rowley-Conwy, P. 2011. Westward Ho! The Spread of Agriculturalism from Central Europe to the Atlantic. Curr. Anthropol. 52(S4):S431-S451.

Rutger, J. 1998. Mission of the Dale Bumpers National Rice Research Center. p. 7-12. In Rutger, J., Robinson, J., Dilday, R. (eds.) Proceedings of the International Symposium on Rice germplasm evaluation and enhancement. Arkansas Agricultural Experimental Station, Fayetteville, Arkansas, USA.

SAG. 2003. Manual técnico para el cultivo de arroz (*Oryza sativa*). Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA), Comayagua, Honduras.

Sales, C.O. 2000. El puerto de Acapulco, enlace con Filipinas, destino final en América. www.mexicodesconocido.com.mx/mex_tiem/mt980803.htm.

Sandoval, C., Velásquez, K. 2017. Análisis de la producción de arroz en Nicaragua en los años 2009-2015. 92 p. Tesis Monográfica Licenciado en Economía. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Facultad de Ciencias Económicas, Departamento de Economía, Managua, Nicaragua.

Santamaría, G. 1970. Situación actual del arroz en Guatemala. In Montoya, L. (coord.) Reunión técnica sobre programación de la investigación y extensión agrícola en arroz para América Central. Vol. 1. Panamá. 21-25 septiembre. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), San José, Costa Rica.

Sarjeant, C. 2014. Neolithic archaeology in Southeast Asia p. 17-34. In Contextualizing the Neolithic occupation of Southern Vietnam: the role of ceramics and potters at An Son: ANU Press. The Australian National University. Canberra, Australia.

Sattar, S. 2000. Bridging the rice gap in Bangladesh. In Papademetriou, M., Dent, F., Herath, E. (eds.) Bridging the rice yield gap in the Asia-Pacific Region. FAO, Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand.

Scarpati, O., Capriolo, A., Puga, Y. 2016. Producción arrocera y evolución de elementos climáticos en la provincia de Corrientes (Argentina). Estudios Geográficos 27:311-331. doi:10.3989/estgeogr.201611.

Schiller, J., Hatsadong, M., Doungsila, K. 2006. A history of rice in Laos. In Schiller, J.M., Chanphengxay, M.B., Linquist, B., et al. (eds.) Rice in Laos. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Schultz, E. 1932. El cultivo de arroz en Tucumán. Bol. Est. Exp.Agric. Tucumán 18:1-11.

Sermet, J. 1953a. Le riz au Portugal. Ann. Géographie 331: 221-222. https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1953_num_62_331_14054#

Sermet, J. 1953b. Progrès de la riziculture en Espagne. Ann. Géograhie 331:222-224.

Serulle, J., Boin, J. 2010. Evolución económica de la República Dominicana, 1884-1930. p. 141-204. En Pons, F.M. (coord.) Historia de la República Dominicana. Historia de las Antillas. Vol. II. Ediciones Doce Calles, S.L., Madrid, España.

Shahzadi, N., Haider, Z., Akhter, M., et al. 2018. Rice in Pakistan: Present scenario, trade, problems and prospects. Res. Rev. J. Agric. Allied Sci. RRJAAS 7:98-103.

Sharma, S. (ed.) 2010. Rice: Origin, antiquity and history. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Shim, B. 1991. Prehistoric rice cultivation in Korea. J. Korean Archaeol. Soc. 27:5-57.

Shinada, H., Yamamoto, T., Yamamoto, E., et al. 2014. Historical changes in population structure during rice breeding programs in the northern limits of rice cultivation. Theor. Appl. Genet. 127:995-1004.

Shrestha, S. 2004. An economic impact assessment of the rice research program in Bhutan. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Silva, F., Stevens, C., Weisskopf, A., et al. 2015. Modeling the geographical origin of rice using the rice archaeology database. PLoS ONE 10:e0137024.

Simon-Kiss, I. 1979. Rice production and consumption in Hungary. In Chataigner, J. (ed.) Activités de recherche sur le riz en climat méditerranéen. CIHEAM, Montpelier, France. Cah. Options Mediterr. 24:136-138.

Snow, B., Shutler, R., Nelson, D., et al. 1986. Evidence of early rice cultivation in the Philippines. Philippine Quarterly of Culture and Society 14:3-11.

Soares, A., Soares, P., Castro, E., et al. 2004. Melhoramiento genético de arroz em Minas Gerais. Informe Agropecuario 25:19-23.

Son, Z. 2013. Problems of development of agriculture (rice) in the Soviet Far East (1920-1930): The example of the Soviet Koreans. J. Incheon Culture, Seoul 10:56-70.

Spada, A., Mantegazza, R., Biloni, M., et al. 2004. Italian rice varieties: historical data, molecular markers and pedigrees to reveal their genetic relationships. Plant Breed. 123:105-111.

Spijkers, P. 1983. History of the introduction and diffusion of rice in Colombia. p. 43-76. In Rice peasants and rice research in Colombia. Wageningen, The Netherland. 263 p.

Suárez, E. 2012. Programa de mejoramiento genético del arroz en Cuba. Instituto de Investigaciones de Granos, Ministerio de Agricultura, Cali, Colombia.

Sukhomirov, G. 2018. Rice Growing in the Russian Far East: Development, problems, prospects. Regionalistica [Regionalistics] 5: 45-57. (En Ruso)

Sürek, H. 1997. Rice production and research activities in Turkey. In Chataigner, J. (ed.) Activitiés de recherche sur le riz en climat méditerranéen. Cahiers Option Médit. 24:165-173.

Surface, G. 1911. Rice in the United States. Bull. Am. Geogr. Soc. 43:500-509.

Tabien, R., Samonte, S., McClung, A. 2008. Forty-eight years of rice improvement in Texas since the release of cultivar Bluebonnet in 1944. Crop Sci. 48:2097-2106.

Takahashi, M. 1980. The history and future of rice cultivation in Hokkaido. 15 p. The United Nations University, Tokyo, Japan.

Takamiya, H. 2001. Introductory routes of rice to Japan: An examination of the Southern route hypothesis. Asian Perspectives 40:209-226.

Tanaka, K., Honda, T., Ishikawa, R. 2010. Rice archaeological remains and the possibility of DNA archaeology: Examples from Yayoi and Heian periods of Northern Japan. Archaeol. Anthropol. Sci. 2:69-78.

Tinoco, R., Acuña, A. 2008. El cultivo del arroz (*Oryza sativa*). Manual de recomendaciones del cultivo de arroz. 78 p. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Agropecuaria (INTA), San José, Costa Rica.

Tinsley, 1995. Rice research and production in the Commonwealth of Independent States (CIS). IRRI Discussion Paper Series N° 9. p. 1-14. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Travis, A., Norton, G., Datta, S., et al. 2015. Assessing the genetic diversity of rice originating from Bangladesh, Assam and West Bengal. Rice 8:35.

Vaca, L. 1970. Situación actual del arroz en Nicaragua. In Montoya, L. (coord.) Reunión técnica sobre programación de la investigación y extensión agrícola en arroz para América Central. Vol. 1. Panamá. 21-25 septiembre. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), San José, Costa Rica.

Van Andel, T. 2010. African rice (*Oryza glaberrima* Steud.): lost crop of the enslaved Africans discovered in Suriname. Econ. Bot. 64:1-10.

Van Andel, T., Meyer, R., Aflitos, S., et al. 2016. Tracing ancestor rice of Suriname Maroons back to its African origin. Nat. Plants 2:16149.

Van Andel, T., Veltman, M., Bertin, A., et al. 2019. Hidden rice diversity in the Guianas. Front. Plant Sci. 10:1161.

Vanna, L. 2002. Remains in the prehistoric pottery tempers of the shell midden site of Samrong Sen: Implication for early rice cultivation in Central Cambodia. Aséanie 9:13-34.

Vargas, A. 1970. Situación actual del arroz en Costa Roca. In Montoya, L. (coord.) Reunión técnica sobre programación de la investigación y extensión agrícola en arroz para América Central. Vol. 1. Panamá, 21-25 septiembre. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), San José, Costa Rica.

Viegas, G., Germek, E., Miranda, H. 1945. Contribuição para a melhora da rizicultura no Estado de São Paulo. Bragantia 5:187-196.

Vijulie, I., Manea, G., Tîrlă, L. et al. 2016. Revival of the rice crops in the south of Romania: Pros and cons. Procedia Environ. Sci. 32: 373-385.

Von Chang, C. 1970. Situación actual del arroz en Panamá. In Montoya, L. (coord.) Reunión técnica sobre programación de la investigación y extensión agrícola en arroz para América Central. Vol. 1. Panamá 21-25 septiembre. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), San José, Costa Rica.

Weber, S., Fuller, D. 2008. Millets and their role in early agriculture. Pradghara 18:69-90.

Weber, S., Lehman, H., Barela, T., et al. 2010. Rice or millet: early farming strategies in prehistoric Central Thailand. Archaeol. Anthropol. Sci. 2:79-88.

Weisskopf, A. 2016. Elusive wild foods in South East Asian subsistence: Modern ethnography and archaeological phytoliths. Quat. Int. 1-11.

Wisseman. J. 2007: Water and rice in early Java and Bali. p. 235-258. In Boomgaard, P. (ed.) A world of water: rain, rivers and seas in Southeast Asian histories. Brill, 2007.

Wohlfarth, B., Higham, C., Yamoaah, K., et al. 2016. Human adaptation to mid-to late-Holocene climate change in Northeast Thailand. The Holocene 26:614-626.

Zach, B. 2002. Vegetable offerings on the Roman sacrificial site in Mainz, Germany - short report on the first results. Veget. Hist. Archaeobot 11:101-106.

Zelensky, G. 2016. Biological principles of rice breeding p. 73-105. In Rice: Biological principles of breeding and farming practices. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Kuban State Agrarian University, Krasnodar. 230p.

Zhang, C., Hung, H. 2013. Eastern Asia: archaeology. p. 209-216. In Ness, I., Bellwood, P. (eds.) Encyclopedia Human Migration. Vol. 1: Prehistory. N. Y. Willey-Blackwell.

Zheng, Y., Crawford, G., Jiang, L., et al. 2016. Rice domestication revealed by reduced shattering of archaeological rice from the Lower Yangtze valley. Nat. Sci. Rep. 6:28136.

Zohary, D., Hopf, M. 2000. Domestication of plant in the Old World. 3rd ed. Oxford University Press, New York, USA.

Capítulo 3. Diversidad y estructura genética del germoplasma de arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile

Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Alexis Salas B., Gabriel Donoso Ñ.

El Programa de Recursos Genéticos de INIA posee una colección activa de germoplasma de 1.200 genotipos, provenientes, principalmente, de países de clima templado. Debido a que las condiciones climáticas que presenta el país son días largos y bajas temperaturas, y a que la producción en Chile es principalmente de un grano comercial largo-ancho, el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz (PMGA) debe desarrollar sus propias variedades. Esta situación deja al programa de mejoramiento genético en una situación compleja para obtener germoplasma, ya que no existen otros países donde se presente esta combinación de requerimientos climáticos y de mercado juntos. Germoplasma adaptado a las condiciones climáticas chilenas se podría encontrar en el norte de China, Corea y Japón. Sin embargo, el grano comercial de esos países es el típico arroz *japonica*, más pequeño y redondeado que el requerido en nuestro país. De ahí que una de las principales limitaciones de los programas de mejoramiento genético de arroz sea la baja diversidad genética disponible, lo que se ha traducido en el desarrollo de variedades con una alta vulnerabilidad genética (Kaneda, 1985; Didlay, 1990; Cuevas-Pérez et al., 1992; Montalban et al., 1998; Guimarães, 2002; Leung et al., 2015; Becerra et al., 2017).

Tradicionalmente, el germoplasma de arroz se ha evaluado por características morfológicas, agronómicas, de tolerancia a frío, rendimiento y calidad de grano. Sin embargo, las principales limitantes de esta caracterización son la influencia ambiental, el tiempo requerido para colectar los datos y el desconocido número de genes involucrados en estas características (Becerra y Paredes, 2000).

Actualmente, los marcadores moleculares permiten detectar cambios en el genotipo del individuo con una mayor precisión, lo que permite complementar la caracterización fenotípica convencional (Gonzaga et al., 2015; Liu et al., 2015; Reig-Valiente et al., 2016; Ndjiondjop et al., 2018; Wang et al., 2018; Park et al., 2019; Kishor et al., 2020). En este sentido, la diversidad genética de la colección del germoplasma utilizado por el PMGA no ha sido evaluada. Basado en lo anterior, en este capítulo se describen los análisis realizados sobre una muestra representativa del material genético utilizado por el PMGA con microsatélites (SSR) y polimorfismos de nucleótidos únicos (SNP) para poder estimar la diversidad genética de este material.

Situación de la diversidad y estructura genética del germoplasma de arroz en Chile

Parámetros de diversidad del germoplasma de arroz en Chile

Para determinar el nivel de diversidad, se analizaron 248 accesiones representativas del germoplasma de arroz del PMGA de INIA mediante microsatélites (SSR) ya que representó cerca de un 20% de la colección de trabajo del PMGA. Esta muestra estuvo constituida por accesiones de arroz tipo *japonica* templado y cuatro accesiones aromáticas (Basmati y Sugandh) como germoplasma contrastante. El germoplasma *japonica* estuvo formado por variedades comerciales chilenas antiguas y en uso, variedades comerciales extranjeras y líneas experimentales del PMGA de INIA, y de otros programas de mejoramiento como CIAT, IRRI y de Europa.

Las 248 accesiones fueron evaluadas con 30 microsatélites polimórficos, con la metodología descrita en Becerra et al. (2017). Estas accesiones presentaron un total de 183 alelos, con un promedio de 6,1 alelos por locus, y con un rango entre 2 y 14 (Cuadro 1). Los loci (SSR) que detectaron mayor polimorfismo fueron RM8068 (14 alelos), RM286 y RM44 (11 alelos), y RM547 (10 alelos). En contraste, los loci menos polimórficos fueron RM17 (2 alelos) y RM502, RM482, RM561, RM509 y RM555 (3 alelos). Los parámetros de diversidad genética obtenidos en este estudio (Cuadro 1) muestran que la frecuencia promedio del alelo más común fue 0,61 y el marcador RM555 mostró la mayor frecuencia alélica (0,87). La frecuencia promedio del alelo más escaso fue 0,028, mientras que los marcadores RM1261 y RM243 detectaron la menor frecuencia alélica.

Por otro lado, el promedio de genotipos diferenciados fue de 7,03 y RM8068 detectó 17 genotipos, siendo el marcador más eficiente, seguido de RM44 que diferenció 15 genotipos. La diversidad genética (He) promedio del germoplasma fue de 0,52, mientras que la mayor diversidad (0,73) fue detectada por los marcadores RM44 y RM241. La heterocigosidad promedio fue muy baja (0,01) y el mayor valor (0,05) detectado fue con el RM560. Cabe mencionar que varios loci (53 %) detectaron homocigosidad completa. El contenido de información polimórfica (PIC) promedio del material estudiado fue de 0,47.

En comparación con la diversidad genética de germoplasma de otras regiones, Lu et al. (2005) analizaron 145 accesiones de arroz de U.S.A. con 169 SSR, detectando 870 alelos con un promedio de alelos por locus de 5,2 (fluctuando entre 2 -21 alelos) y con un PIC promedio de 0,46, similar a la diversidad genética promedio del germoplasma chileno. La heterocigosidad en este estudio fue de 3,1 %, muy alta comparada con el valor chileno.

Estudios realizados en 150 variedades en China detectaron 1063 alelos (Zhang et al., 2011), con un promedio de 3,9 alelos por locus y un rango entre 2 y 12 alelos por locus, valores inferiores a los valores del material genético usado en Chile. El valor PIC promedio fue de 0,48. El promedio de alelos por locus para *indica* y *japonica* fue 3,71 y 3,26, respectivamente. La diversidad genética promedio para el arroz tipo *indica* y *japonica* fue de 0,48 y 0,45, respectivamente. En un segundo estudio realizado en China en 416 accesiones analizadas con 100 SSR, se detectaron 390 alelos, con un promedio de 3,9 alelos por locus, una diversidad genética de 0.47 y un valor del PIC 0.42 (Jin et al., 2010).

Otras colecciones mundiales del arroz también han sido sujetas a estudios de su diversidad genética. Es así como Yan et al. (2010), estudiando una colección mundial del USDA de 1.794 accesiones provenientes de 112 países y que conforman 14 regiones geográficas, determinaron un promedio de alelos por locus de 7,8, una frecuencia del alelo más común de 0,52, una diversidad genética de 0,61 y un valor de PIC de 0,57. Por su parte, Xu et al. (2004) determinaron en una colección de 236 accesiones *indica* y *japonica*, analizadas con 60 SSR, un total de 714 alelos con un promedio de 11,9 por locus, con una fluctuación de 2 a 34 alelos, un valor PIC promedio de 0,74 para la colección mundial (rango 0,17 - 0,92), y un valor PIC promedio de 0,50.

Un estudio genético realizado por Garris et al. (2005) mostró que los grupos *indica* y *japonica* tropical contienen un mayor porcentaje de polimorfismo (99 %) y que tienen un mayor número de alelos por locus, 7,26 y 6,09 respectivamente. En el mismo estudio, el grupo de *japonica* templado presentó la menor diversidad genética, comparado con los otros grupos de arroz, con un 91 % de loci polimórficos y 4.9 alelos por locus. El valor promedio general de PIC entre los cultivares fue 0,67, y el valor PIC de *japonica* templado fue de sólo 0,37, PIC inferior al detectado en el germoplasma usado en el germoplasma chileno (0,47).

Cuadro 1. Microsatélites, número de alelos, frecuencia mayor y menor de alelos, número de genotipos, diversidad génica, heterocigosidad y contenido de la información polimórfica (PIC).

Marcador SSR	Número de alelos	Mayor frecuencia alélica	Menor frecuencia alélica	Número de genotipos	Diversidad Génica (He)	Heterocigosidad	PIC
RM1164	5	0,62	0,004	5	0,51	0,00	0,43
RM8068	14	0,61	0,004	17	0,61	0,02	0,60
RM413	4	0,60	0,004	5	0,51	0,02	0,41
RM286	11	0,58	0,012	13	0,64	0,01	0,62
RM10	6	0,46	0,008	6	0,62	0,00	0,55
RM502	3	0,79	0,004	4	0,34	0,02	0,28
RM21	6	0,77	0,008	7	0,39	0,01	0,37
OSR28	8	0,48	0,004	12	0,67	0,03	0,62
RM44	11	0,44	0,004	15	0,73	0,03	0,70
RM276	5	0,77	0,012	5	0,39	0,00	0,36
RM259	7	0,52	0,004	7	0,63	0,00	0,57
RM1230	5	0,90	0,004	5	0,19	0,00	0,19
RM482	3	0,58	0,034	3	0,51	0,00	0,41
RM537	4	0,76	0,008	4	0,37	0,00	0,32
RM547	10	0,62	0,004	11	0,59	0,01	0,56
RM561	3	0,46	0,190	5	0,63	0,04	0,55
RM560	4	0,47	0,020	5	0,61	0,05	0,53
RM1261	7	0,55	0,002	8	0,60	0,02	0,54
RM241	10	0,42	0,016	10	0,73	0,00	0,69
RM426	8	0,67	0,004	8	0,53	0,00	0,51
RM17	2	0,64	0,357	2	0,46	0,00	0,35
RM243	7	0,47	0,002	8	0,64	0,01	0,57
RM406	6	0,81	0,008	6	0,33	0,00	0,31
RM447	4	0,85	0,008	4	0,26	0,00	0,24
RM509	3	0,77	0,036	3	0,36	0,00	0,32
RM510	5	0,52	0,008	5	0,52	0,00	0,41
RM525	7	0,42	0,012	10	0,71	0,04	0,66
RM555	3	0,87	0,028	3	0,24	0,00	0,22
RM583	7	0,49	0,004	8	0,69	0,01	0,65
RM5463	5	0,47	0,021	7	0,62	0,03	0,54
Promedio	**6,1**	**0,61**	**0,028**	**7,03**	**0,52**	**0,01**	**0,47**

Fuente: Becerra et al., 2017

En relación a la diversidad genética en material silvestre, un estudio de 10 especies silvestres determinó un mayor PIC (0,78) en comparación a las variedades de U.S.A. que tuvieron el PIC de 0,39, y una mayor diversidad genética promedio de 0,43, fluctuando entre 0,03 a 0,86 (Agrama y Eizenga, 2008).

En resumen, los valores de diversidad en el germoplasma chileno son, en general, inferiores a los reportados anteriormente, al considerar toda la estructura genética del arroz, es decir, *indica*, *aus*, *aromatica*, *japonica* templada y tropical (Garris et al., 2005; Lipitan et al., 2007; Caicedo et al., 2007; Liakat et al., 2011; Jamil et al., 2013), pero es muy similar comparado con los valores reportados en germoplasma *japonica* templado.

Las diferencias observadas en la diversidad entre diferentes poblaciones de arroz, se deben a su historia demográfica. La información generada por la secuenciación del arroz sugiere que *indica* y *japonica* templada divergieron hace 440.000 años atrás. Por otro lado, se ha determinado que *japonica* templado tiene una menor diversidad genética y una estrecha relación genética con *japonica* tropical (Ni et al., 2002), ya que posiblemente *japonica* templado se derivó del grupo *japonica* tropical (Garris et al., 2005) y en cada una de estas separaciones se han producido cuellos de botella que ha significado una reducción de la diversidad genética de la nueva población emergente (Zhu et al., 2007). Ante este escenario, las accesiones de *japonica* templado poseen una menor diversidad genética y se necesita ampliar esta base genética, principalmente a través de la incorporación de germoplasma de zona de origen (Zeng et al., 2007) o de grupos cercanos genéticamente como el *japonica* tropical.

Estructura del germoplasma

Los microsatélites son marcadores codominantes que tienen un amplio rango de aplicaciones prácticas en el campo del mejoramiento genético. Este trabajo es el primer análisis genotípico integral de un número representativo (248 individuos) del germoplasma *japonico templado* adaptado a las condiciones chilenas, combinado con un gran número (183) de loci.

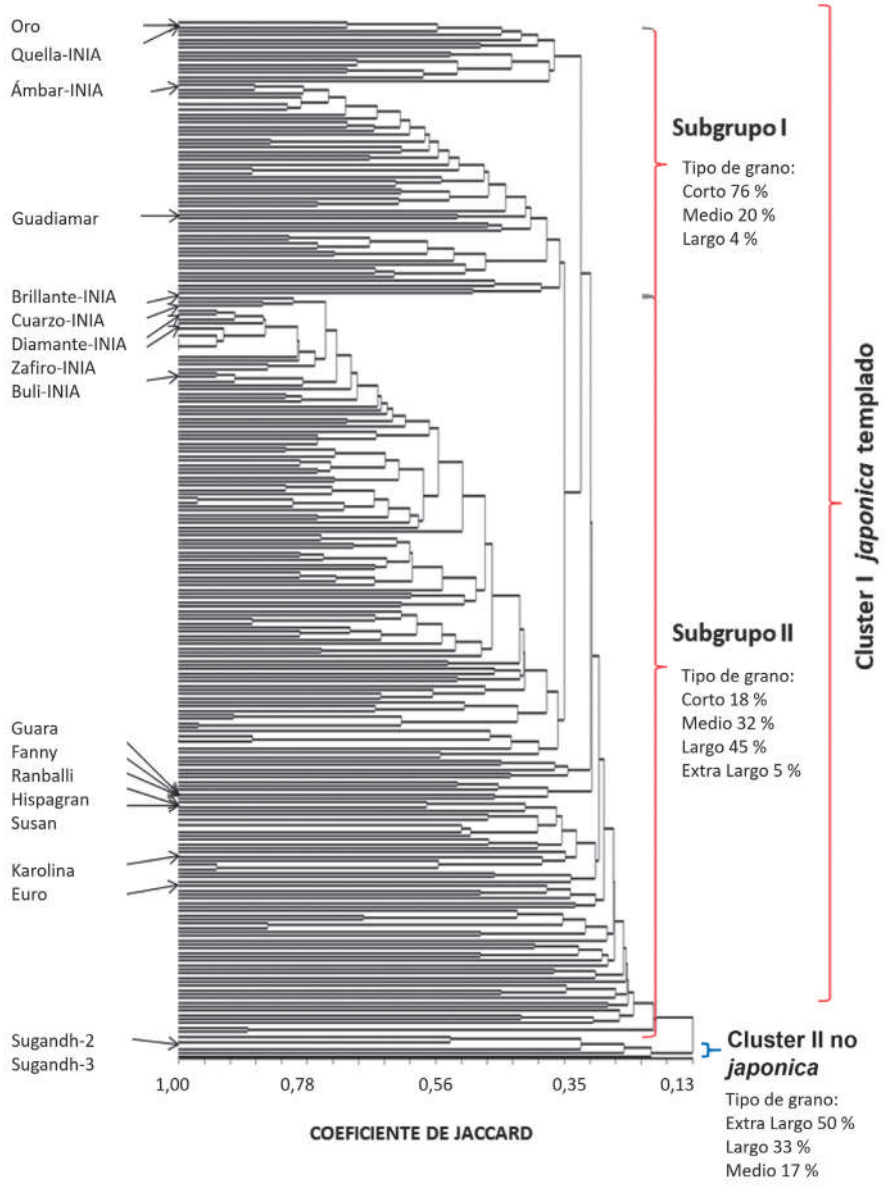
Para determinar la estructura genética del germoplasma de arroz usado en Chile, se generó un dendrograma que agrupó las accesiones en dos grupos principales (Figura 1). El grupo I incluyó 242 accesiones de *japonico* templado, mientras que el grupo II incluyó las 6 accesiones no *japonica* usadas en este estudio. Cabe señalar que la mayoría de los 248 genotipos analizados fueron genéticamente discriminados por los 30 SSR, con la excepción de los siguientes grupos de genotipos: INIA27-Quila256101; INIAG152-INIAG144; RQuila636-INIAG99-INIA169-INIAG165; Quila230602-Quila230603; Quila194603-Quila194602; y ´Sungandh-2`-´Sugandh-3`. El coeficiente de correlación cofenética entre la matriz cofenética y la matriz original de los datos SSR fue de 0,80, lo que significa que la matriz original está bien representada en el dendrograma.

El grupo I, representado por los 243 genotipos de *japonica* templado, se subdividió en dos subgrupos principales, los cuales tendieron a agruparse por tipo de grano. El primer subgrupo incluyó 66 genotipos, en su mayoría con grano corto (76 %) y medio (20 %), con una relación largo ancho de 2,0. Este subgrupo incluyó a las variedades chilenas de grano corto, ´Oro`, ´Quella-INIA` y ´Ámbar-INIA`.

Por otro lado, el subgrupo II incluyó 176 genotipos, representado por accesiones de grano largo (45%) y medio (32%) con una relación largo ancho de 2,5 a 3,0. Este subgrupo incluyó las variedades chilenas de grano largo-ancho´Brillante-INIA`, ´Cuarzo-INIA`, ´Diamante-INIA`, ´Zafiro-INIA` y ´Buli-INIA`. Además, estas variedades presentaron una diversidad genética muy baja entre ellas, lo que señala el alto nivel de parentesco existente (Figura 1). Es así como´Diamante-INIA' y´Zafiro-INIA' presentaron un alto índice de similitud genética (96 %), a pesar de que fueron desarrolladas mediante diferentes métodos de selección, pedigrí y selección recurrente, lo que señala la escasa diversidad genética de los padres utilizados en su generación.

Por otro lado, las variedades introducidas desde Europa también tendieron a agruparse entre ellas (´Guara`, ´Fanny`, ´Hispagran`, ´Susan`, ´Karolina`, ´Euro`), aunque son más lejanas genéticamente a las variedades chilenas.

El grupo II, que incluyó los seis genotipos no *japonica*, estuvo conformado por genotipos de grano extra largo (50 %) y largo (33 %), con una relación largo ancho sobre 3,0, entre ellos Basmati (*aromatica*), ´Sugandh-2`, ´Sugandh-3` (arroces aromáticos), ´Chu Xiang` (China), PRA557 (Madagascar) y Quila 261601. El material chileno Quila 261601 se agrupó junto a ellos, debido a que uno de sus progenitores es ´Sugandh-2`.



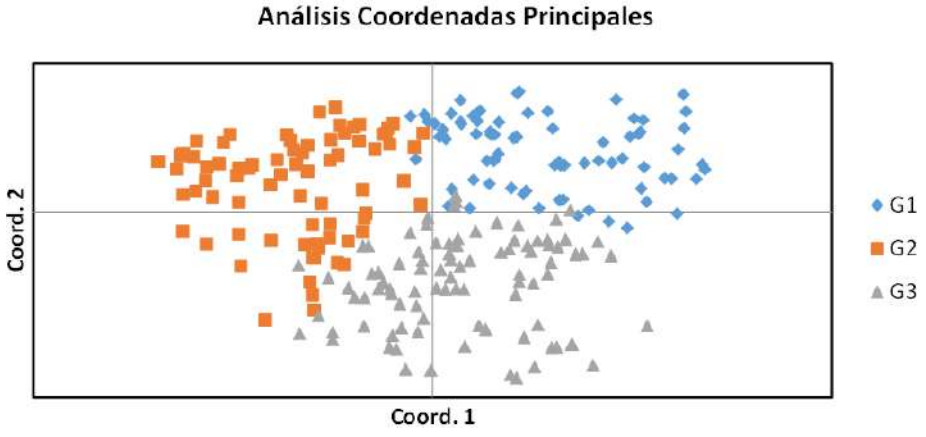
Fuente: Becerra et al., 2017.

Figura 1. Dendrograma de diversidad genética de 249 accesiones de arroz *japonica* templada chilenas, evaluadas con 30 microsatélites (Coeficiente de Jaccard).

La agrupación de las accesiones por tipo de grano ha sido reportada anteriormente en variedades de la India y Taiwán (Kumari et al., 2011; Chuang et al., 2011). En este caso, se postula que algunos SSR podrían estar asociados con regiones del genoma que determinan el tamaño del grano (Huang et al., 2013). La presencia de este tipo de marcadores sería de gran utilidad para la selección temprana, considerando que el tamaño de grano es uno de los principales criterios para determinar la estructura del germoplasma de arroz y la calidad comercial del grano (Courtois et al., 2012).

Cabe destacar que el tamaño de grano no tuvo una absoluta relación en la separación de los dos sub grupos observados en el dendrograma, pues en ambos subgrupos se observó una mezcla de los tres tipos de granos. Históricamente, las primeras variedades chilenas fueron del tipo corto-ancho, pero desde principios de 1980 hubo un gran cambio en la preferencia del consumidor y se cambió al consumo de las variedades de grano largo-ancho. El tipo de grano largo-ancho son generalmente producidos en África, América del Sur y Central, Norte América y el Caribe, y la mayoría de estos genotipos son clasificados como *japonica* tropical. Por otro lado, las accesiones del norte de China, Japón y Corea y parte de Europa, Asia Central y Rusia son clasificadas como *japonica* templada, pero poseen un grano pequeño a mediano. Por lo tanto, el gran desafío de Chile es desarrollar un germoplasma *japonica* templado con grano largo-ancho, precoz, de calidad y tolerante al frío en las etapas vegetativas y reproductivas.

El análisis de Coordenadas Principales (C) muestra la presencia de tres grupos (G1, G2 y G3), similar a lo mostrado por el dendrograma. Estas agrupaciones se distribuyen a lo largo de C1 y C2 en la Figura 2, donde el grupo 1 se concentra principalmente en el segundo cuadrante, 2/3 del Grupo 2 se concentra en el cuadrante 1, y 2/3 del grupo 3 se concentra en el cuadrante 4. Los grupos 2 y 3 entremezclan algunos genotipos en el cuadrante 3, lo mismo que los grupos 1 y 2 en el cuadrante 2. En general, cerca de un 70 % de la variación total se explica por las tres primeras coordenadas, lo que indica que los tres grupos de arroz *japonica* templada y el germoplasma no *japonica* son diferentes entre ellos.



Fuente: Becerra et al., 2017.

Figura 2. El análisis de Coordenadas Principales muestra la distribución especial de 249 accesiones de arroz *japonica templada* evaluadas con 30 microsatélites.

Determinación de la estructura de poblaciones mediante SSR

La estructura de la población de las 248 accesiones se analizó utilizando el método Bayesiano en el que cada grupo o población se basa en la probabilidad para cada número de grupos (K). Este

enfoque permite determinar el número de grupos existentes en la población en base a una mayor probabilidad (Lu et al., 2005).

Selección de deme (K) para SSR

En este estudio, los valores K fueron barridos desde 2 a 20, con 100 repeticiones de determinación con el programa ´Structure`, para cada K (Figura 3). El primer panel muestra el valor promedio de máxima verosimilitud y el error para valor de K. Los datos del primer gráfico son derivados a la primera y segunda, para posteriormente calcular el delta K para cada posición. Este análisis permitió determinar un valor de K=6, como el óptimo para los datos de poblaciones ensayados.

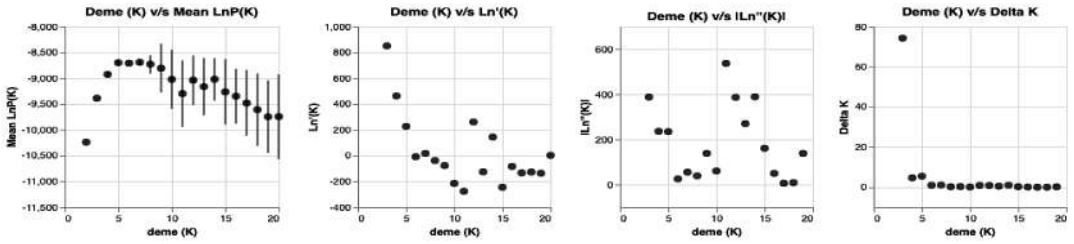


Figura 3. Exploración de valores K y resultados de máxima verosimilitud para el análisis de SSR.

Análisis de estructura de la población mediante SSR

Para el análisis de los SSR, se construyó una matriz con 248 individuos y 30 marcadores microsatélites como loci, con período de iteración de 10,000 y 20,000 repeticiones de MCMC, con un modelo Bayesiano y de máxima verosimilitud ejecutadas con el programa ´Structure` (Pritchard et al., 2000). Estos cálculos fueron paralelizados utilizando ´Structure threader` (Pina-Martins et al., 2017), realizando un barrido de valores de ´deme` desde K=2 a K=20 con 100 repeticiones de corrida de ´Structure` por K. Para obtener el mejor K se analizaron múltiples corridas de ´Structure` con el método de Evanno (Evanno et al., 2005) y se determinó el K analizando visualmente el gráfico de delta K v/s K. Al converger el valor de delta a un mínimo, se puede seleccionar uno de estos K. Se eligió aquél con menor error desde el gráfico. Este procedimiento permitió identificar a 6 grupos de genotipos.

Se seleccionó la primera repetición correspondiente al K seleccionado y se ordenó por el valor máximo de cada fracción y al grupo correspondiente. Este procedimiento permitió identificar grupos análogos a la función de clasificación de ´Structure`. Posteriormente, la composición de cada individuo fue normalizada y reducida dimensionalmente con T-SNE (Li et al., 2017), para luego ser analizada por los algoritmos de varios tipos de agrupamiento: jerárquico con el método de Ward (grupos definidos visualmente), aglomerativo con el método K-means (grupos asignados arbitrariamente), por agrupamiento jerárquico basado en densidades, HDBSCAN (McInnes et al., 2017) (no se define el número de grupos, pero sí el número mínimo de individuos).

En un gráfico de barras acumulado se grafica la proporción de cada individuo para el K=6. Los individuos son etiquetados y ordenados por el máximo valor de cada individuo y el K de pertenencia (Figura 4). En la parte superior del gráfico de barras se colorean los grupos identificados por el sorteo de ´Structure` (Structure - 6 grupos), los de agrupamiento por K-means (K-means - 6 grupos), y clustering por HDBSCAN (HDBSCAN - 5 grupos).

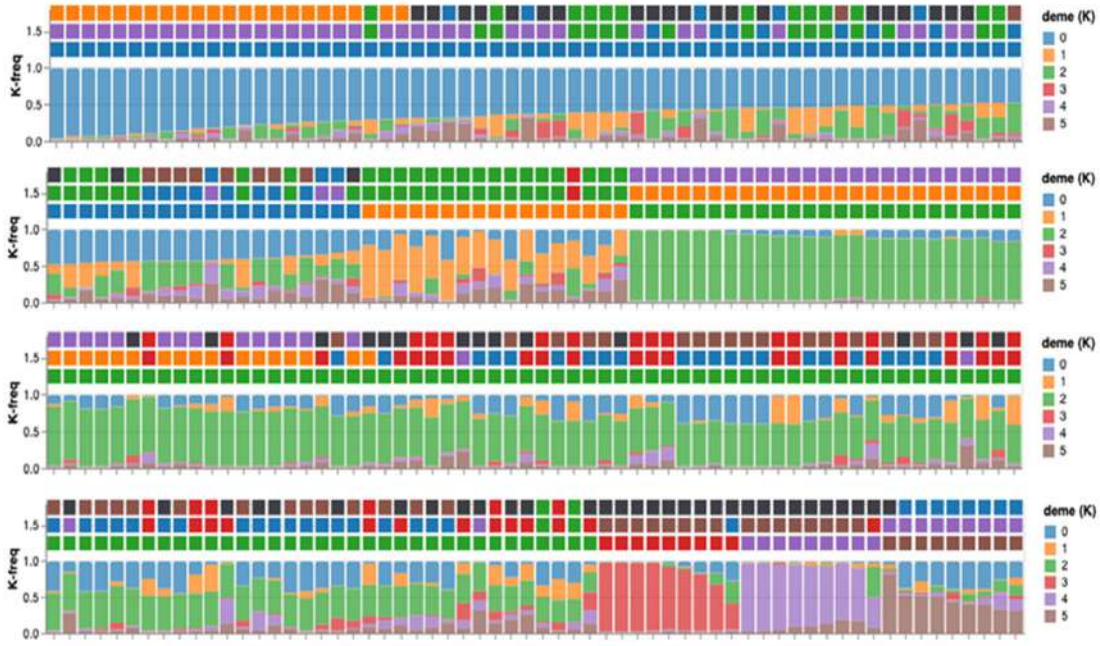


Figura 4. Germoplasma *de Oryza sativa* ordenado por fracciones genómicas obtenidas mediante el análisis de SSR.

Agrupamiento jerárquico de distancia genética mediante SSR

Se observa un dendrograma con el análisis de la matriz de distancia y el método de Ward truncado a 100 hojas, donde los valores del eje X son el número de hojas colapsado o la etiqueta del individuo. Para determinar los grupos se realizó un corte arbitrario a 60 de distancia, donde se identificaron 5 grupos (en colores verde, rojo, celeste, moradas y amarillo) (Figura 5).

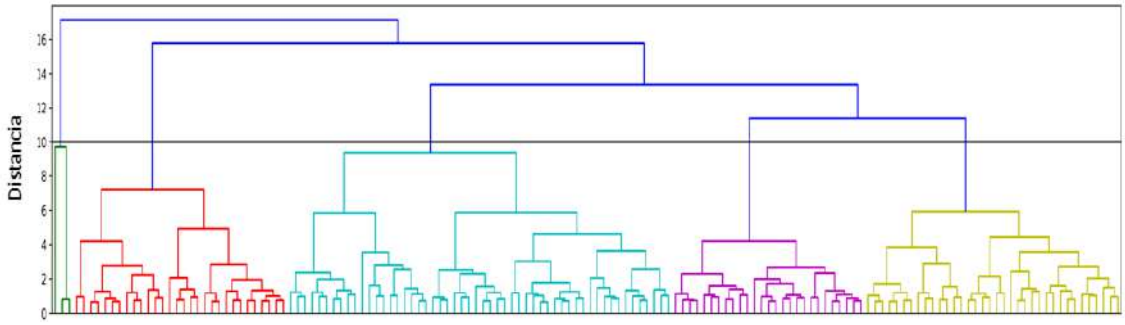


Figura 5. Dendrograma Jerárquico de Agrupamiento (Truncado), basado en distancia genética de *Oryza sativa* analizado mediante SSR.

Determinación de la estructura de poblaciones mediante SNP

Selección de ´deme` (K) para SNP

Los valores K fueron explorados mediante barridos desde 2 a 20, con 100 repeticiones de determinación con ´Structure` para cada K (Figura 6). El primer panel muestra el valor promedio de máxima verosimilitud y el error para valor de K. Los datos del primer gráfico son derivados a la primera y segunda, para posteriormente calcular el delta de K para cada posición. Este procedimiento permitió determinar el valor de K=6, como el óptimo para los datos poblaciones ensayados.

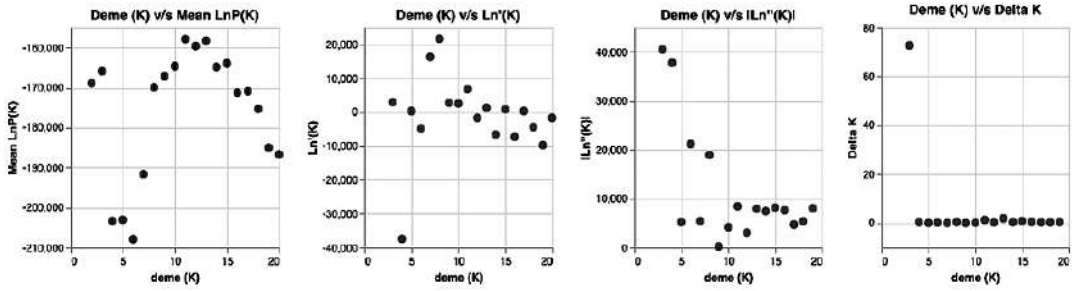


Figura 6. Exploración de valores K y resultados de máxima verosimilitud para el análisis de SNP.

Análisis de estructura de la población mediante SNP

Para el análisis de los SNP, se construyó una matriz con los mismos 248 genotipos de *O. sativa* y 3196 loci desde los SNP. ´Structure` (Pritchard et al., 2000) fue ejecutado con parámetros por defecto de quemado de 10,000 y 20,000 repeticiones de MCMC. La ejecución de ´Structure` fue paralelizada por ´Structure threader` (Pina-Martins et al., 2017), en un barrido de 2-20 K en 100 repeticiones con un total de 2,000 simulaciones. Para obtener el mejor K se analizaron múltiples corridas de ´Structure` con el método de Evanno y se determinó el K, analizando visualmente el gráfico de delta K v/s K. Al converger el valor de delta a un mínimo, se puede seleccionar uno de estos K, para decidir aquel con menor error desde el gráfico.

Al igual que en el análisis de los SSR, para los SNP se seleccionó la primera repetición correspondiente al K seleccionado, y se ordenó por el valor máximo de cada fracción y a qué ´cluster` corresponde, lo cual permitió identificar grupos análogamente a la función ´Clasificación` de ´Structure`. Luego, la composición de cada individuo fue normalizada y reducida dimensionalmente con T-SNE (Li et al., 2017), para después ser analizada por los algoritmos de agrupamiento: jerárquico con método de Ward (grupos definidos visualmente), aglomerativo con el método K-means (grupos asignados arbitrariamente), por ´clustering` jerárquico basado en densidades, HDBSCAN (McInnes et al., 2017) (no se define el número de grupos, pero sí el número mínimo de individuos).

En un gráfico de barras acumulado, se grafica la proporción de cada individuo para el K=6. Los individuos son etiquetados y ordenados por máximo el valor de cada individuo y el K de pertenencia.

En la parte superior del gráfico de barras se colorean los grupos identificados por el sort de ´Structure` (Structure - 6 grupos), los de agrupamiento por K-means (K-means - 6 grupos), y ´clustering` por HDBSCAN (HDBSCAN - 3 grupos) (Figura 7).

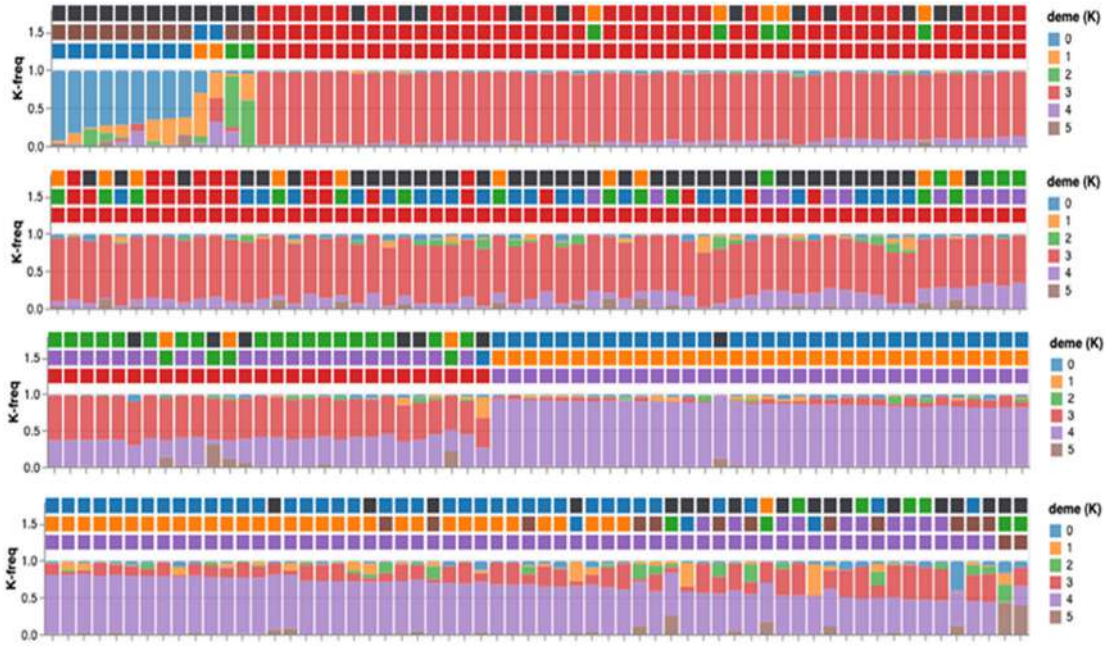


Figura 7. Germoplasma *de Oryza sativa* ordenado por fracciones genómicas obtenidas mediante el análisis de SNP.

Agrupamiento jerárquico por matrices de distancia mediante SNP

Se observa un dendograma con el análisis de la matriz de distancia y el método de Ward truncado a 150 hojas, donde los valores del eje X son el número de hojas colapsado o la etiqueta del individuo. Para determinar los grupos se realizó un corte arbitrario a 60 de distancia. Se identificaron 5 grupos (en colores verde, rojo, celeste, morado y café) (Figura 8).

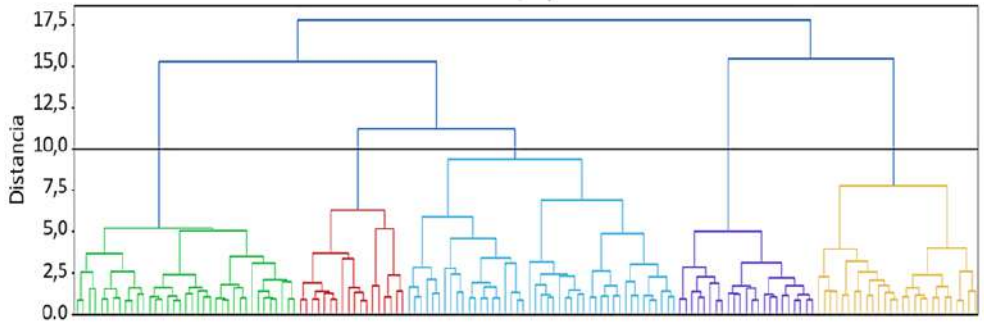


Figura 8. Dendrograma Jerárquico de Agrupamiento (Truncado) de *Oryza sativa* mediante SNP.

El número de grupos obtenidos fue el mismo para SSR y SNP; sin embargo, las agrupaciones de las accesiones son distintas con estos marcadores. Con SNP no hubo una agrupación relacionada con el tipo de grano. El alto número de grupos identificados indica que el material genético, pese a ser *japonica* templado, tiene un alto grado de introgresiones provenientes de otro tipo de germoplasma, producto de las numerosas introducciones y cruzas reiteradas en el PMGA. A pesar de las variaciones detectadas por los SSRs y los SNPs en el germoplasma, éstas no han influido en gran medida en el nivel de diversidad genética observada a nivel molecular como fenotípico en las variedades desarrolladas.

Situación de la diversidad y estructura genética de variedades comerciales en Chile

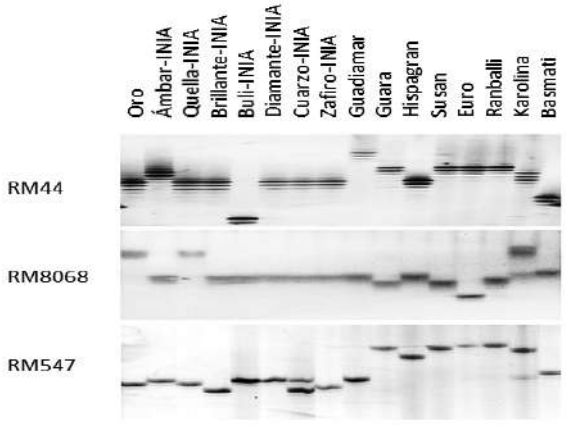
Los estudios de variedades de arroz mediante herramientas moleculares son escasos en nuestro país, siendo una actividad de crucial importancia para un programa de mejoramiento genético, pues permite identificar y certificar variedades, como también determinar la relación genética entre ellas. En Chile existen variedades comerciales de grano largo ancho y corto principalmente, las cuales han sido generadas por el programa de mejoramiento genético de arroz del INIA (Paredes et al., 2015).

El ´fingerprinting` o huella genética como tecnología, para elaborar perfiles genéticos únicos mediante el uso de microsatélites, marcadores posibles de usar a nivel operativo, permite distinguir variedades de arroz (McCouch et al., 2002; Garris et al., 2005; Lu et al., 2005; Chuang et al., 2011; Islam et al., 2011; Kanawapee et al., 2011), incluso cuando las variedades tienen un fondo genético muy estrecho (muy emparentadas) (Zhu et al., 2012). También se ha logrado identificar variedades de alto rendimiento (Xin et al., 2005) y adulteraciones de arroz élite de grano fino en lotes de semillas (Kumari et al., 2011). Incluso en Taiwán, los SSR se utilizaron para identificar el arroz pulido, comercializado en el mercado interno, para prevenir la actividad comercial fraudulenta de variedades protegidas de arroz (Chuang et al., 2011).

El objetivo de este estudio fue determinar el grado de parentesco entre las variedades comerciales chilenas y su relación con variedades de otras regiones geográficas. Las variedades chilenas analizadas fueron: ´Oro`, ´Ámbar-INIA`, ´Quella-INIA`, ´Brillante-INIA`, ´Buli-INIA`, ´Diamante-INIA`, ´Cuarzo-INIA`, ´Zafiro-INIA`, y las extranjeras ´Guadiamar`, ´Guara`, ´Hispagran`, ´Susan`, ´Euro`, ´Ranballi` y ´Karolina`, usando Basmati del grupo de arroces aromáticos como genotipo diferenciador, y utilizando microsatélites.

Parámetros de diversidad genética de las variedades comerciales

Cuando se analizaron 16 variedades comerciales chilenas con 54 SSR, se detectó un total de 191 alelos, con una media de 3,5 alelos por locus (Becerra et al., 2015). Un 65 % de los SSR analizados detectaron sólo 2 o 3 alelos por locus, comparados con los 15 alelos por locus, observados en variedades brasileñas (Brondani et al., 2006). Los loci más polimórficos fueron RM547 (8 alelos), RM44 (7 alelos) y RM8068 (6 alelos) (Figura 9). La diversidad genética promedio fue de 0,50 y el promedio de heterocigosidad fue 0,002, valor esperado en una especie de autopolinización.



Fuente: Becerra et al., 2015.

Figura 9. Patrón de bandas detectadas en 16 variedades comerciales de arroz con los SSR RM44, RM8068, y RM547.

El valor promedio PIC fue de 0,44 con un rango de fluctuación de 0,12 a 0,83. Setenta y dos alelos únicos fueron detectados en ciertas variedades (frecuencia ≤ 0,07). Los marcadores microsatélites polimórficos que muestran diferentes bandas podrían ser utilizados como identificadores para una variedad específica.

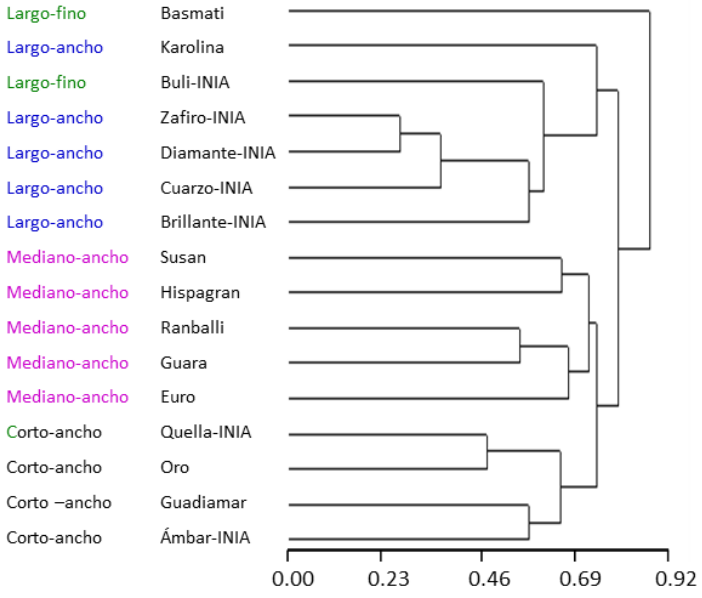
Dado el alto grado de parentesco de las variedades generadas por el programa de arroz del INIA, fue necesario usar un mayor número de SSR (54 SSR) para realizar este estudio. El promedio de alelos fue de 3,5, inferior a los 4,4 obtenidos por Bonow et al. (2009) y a los 11,7 reportados por Rahman et al., (2010) en variedades indias locales.

Este resultado confirma que la diversidad genética es baja entre las variedades comerciales analizadas. Los marcadores RM547 y RM1164 fueron muy importantes en la diferenciación genética de las variedades, lo que corrobora la utilidad de los microsatélites en la identificación de variedades que exhiben una base genética estrecha (Zhu et al., 2012).

Es sabido que el material genético de los programas de mejoramiento es más uniforme debido a la alta presión de selección y al uso de ciertos métodos de selección. Es más, el uso repetido de los padres agronómica e industrialmente aceptados, como progenitores en el programa de cruzas, ha contribuido aún más a disminuir la diversidad del material genético. Ante esta situación, es importante la introducción constante de germoplasma desde otras regiones, para aumentar la base genética de los programas de mejoramiento genético.

Agrupamiento de variedades comerciales basado en distancia genética mediante SSR

Las 16 variedades analizadas se dividieron en dos grupos principales. El primero contiene las 15 variedades *japonica* agrupadas separadamente del genotipo aromático (Basmati) con una media general de 0,76. El análisis de clúster por el método UPGMA condujo a un dendrograma con un índice de correlación cofenético de 0,93, lo que indica que las distancias reflejan la situación real de la muestra estudiadas (Figura 10).



Fuente: Becerra et al., 2015.

Figura 10. Dendrograma basado en la distancia genética de 16 variedades comerciales basadas en un análisis de 54 microsatélites (Coeficiente de Rogers).

El dendrograma muestra dos subgrupos principales dentro de las variedades *japonica*, con una tendencia a agruparse por tipo de grano (Figura 10). La rama inferior contiene las variedades de grano-corto ´Quella-INIA`, ´Oro`, ´Guadiamar`, ´Ámbar-INIA` y las de grano mediano-ancho ´Susan`, ´Hispagran`, ´Ranballi`, ´Euro` y ´Guara`, con valores de relación largo-ancho entre 1,8 y 2,2.

La variedad ´Oro' tuvo una amplia aceptación en el mercado nacional desde 1960 hasta 1980, momento en que las variedades de grano largo ancho empezaron a aumentar su participación en el mercado. Esta variedad ha sido utilizada como progenitor en el PMGA de INIA, de hecho, fue uno de los padres de la variedad de grano corto ´Quella-INIA`, creada en 1979, lo que puede explicar la cercanía genética de estas dos variedades (Figura 10).

Por el contrario, el subgrupo de la rama superior incluye la mayoría de las variedades comerciales INIA de semilla de largo-ancho, como ´Diamante-INIA`, ´Zafiro-INIA`, ´Cuarzo-INIA` y ´Brillante-INIA`, así como la variedad húngara ´Karolina`. Los resultados obtenidos señalan la cercanía genética de las variedades ´Diamante-INIA` y ´Zafiro-INIA' y su relación con ´Cuarzo-INIA` y ´Brillante-INIA` (Figura 11). Por otro lado, la variedad ´Buli-INIA` que también se encuentra en este grupo, se diferencia de las anteriores por poseer un grano largo-fino. Cabe destacar que las variedades comerciales INIA de grano largo-ancho en uso, contienen a ´Diamante-INIA` en su fondo genético, pues esta variedad es y ha sido usada por largo tiempo como progenitora en las cruzas que generan nuevas variedades. Ello explica su cercanía genética ya que fue la primera variedad de grano largo-ancho sembrada en el país y creada por INIA. Separadamente, se ubica Basmati (grano largo-fino) en la rama superior del dendrograma.

Estos resultados coinciden con los encontrados por Kumari et al. (2011), donde los microsatélites fueron capaces de diferenciar las variedades de India de grano medio-fino y variedades de arroz nacionales y extranjeras en Taiwán (Chuang et al., 2011). Previamente, se ha informado que algunos SSR están asociados con regiones de ADN genómico que determinan el tipo de grano (Huang et al., 2013).

La necesidad de utilizar 54 SSR para discriminar entre 16 variedades, principalmente de tipo *japonica*, indica el alto grado de parentesco, especialmente entre las variedades chilenas. Esto a diferencia de otros estudios, en los que se han usado un menor número de SSR para discriminar híbridos (He et al., 2012) y variedades (Brondani et al., 2006; Rahman et al., 2010).

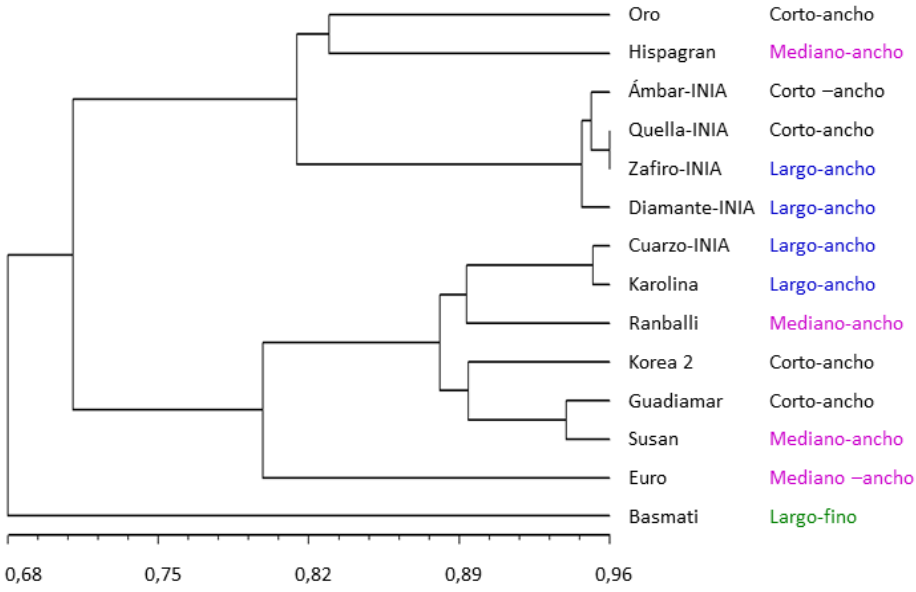
Agrupamiento de variedades comerciales basado en distancia genética mediante SNP

Los SNP corresponden a un cambio único de un par de bases en la secuencia de ADN y que ocurre con una frecuencia alta en el genoma de las especies. Estos cambios pueden ocurrir en regiones codificantes y no codificantes del ADN nuclear y de los plastidios, pudiendo afectar características específicas, o bien representan variaciones neutrales (McCouch et al., 2010). Los SNPs tienen dos alelos, lo que significa que en una población existe la posibilidad de dos pares de bases por cada sitio del SNP y su frecuencia a lo largo de cada cromosoma ha mostrado una distribución desuniforme del polimorfismo (Nasu et al., 2002).

Hoy, los SNP están remplazando los microsatélites (SSR) como marcadores de ADN, debido a su mayor abundancia en el genoma, mayor cobertura y posición conocida en el genoma (Thomson, 2014), lo que aumenta la exactitud en mapeo y la resolución. Además, son automatizados y tienen un costo-efectividad creciente (McCouch et al. 2010, Tam et al., 2019). Una gran cantidad de marcadores SNP han sido desarrollados para el estudio del arroz (Feltus et al., 2004; Yamamoto et al., 2010; Arai-Kichise, 2011; Mvuyekure et al., 2018).

Catorce variedades comerciales de arroz fueron analizadas por 3050 SNP (Geneseek). El análisis de similitud de los datos obtenidos muestra, en el dendrograma, dos grupos principales (Figura

11). El primero contiene 6 variedades, ´Oro` asociada con ´Hispagran` y ´Ámbar-INIA`, ´Quella-INIA`, ´Zafiro-INIA` y ´Diamante-INIA`. Este grupo se mezclan variedades de grano corto, mediano y largo-ancho. El segundo grupo que incluye ´Cuarzo-INIA`, ´Karolina`, ´Ramballi`, ´Korea 2`, ´Guadiamar`, ´Susan` y ´Euro` corresponden a variedades de grano largo-ancho y corto. En forma separada se encuentra el genotipo aromático (Basmati), con una media general de 0,68. Este resultado confirma que los SNP fueron eficientes en diferenciar genotipos de distinto origen.



Fuente: Becerra et al., 2015.

Figure 11. Dendrograma de 14 variedades comerciales basadas en un análisis de SNP (Coeficiente de Jaccard).

Sin embargo, comparando los resultados obtenidos con los SSR y SNPs en el análisis genético de las variedades comerciales, aquellos obtenidos con los SSR presentan una mayor relación con características agronómicas, pues separa las variedades por tipo de grano con mayor exactitud.

Los marcadores SNP son una poderosa herramienta genética, no solo para investigación genómica, ya que, en mejora genética, pueden ser usados para mapeo de QTLs, clonación posicional, haplotipos y análisis de pedigrí, prueba de pureza de semillas e identificación varietal (Nasu et al., 2002; Mc Nally et al., 2009; Mvuyekure et al. 2018).

Consideraciones finales

Este es el primer estudio de diversidad genética del germoplasma del PMGA de INIA mediante SSR y SNP, lo cual representa cerca de un 20% de la colección de trabajo del programa. Los valores de diversidad en el germoplasma chileno son, en general, inferiores a los reportados cuando se considera toda la estructura genética del arroz, pero es similar comparado con valores reportados en germoplasma *japonica* templado.

Dentro del germoplasma se observa una alta cercanía genética entre las variedades chilenas, lo que fue confirmado por el alto número de SSR utilizado. Como se mencionó anteriormente, esta situación se puede deber a los métodos de mejoramiento utilizados y a la baja diversidad genética de los progenitores utilizados. Ante este escenario, este germoplasma necesita ampliar su base genética, principalmente a través de la incorporación de germoplasma de zona de origen

o de grupos cercanos genéticamente, como el *japonica* tropical. No se debe olvidar que el gran desafío de Chile es desarrollar variedades *japonica* templado de grano largo-ancho, precoces, de alta calidad de grano y tolerantes al frío en las etapas vegetativa y reproductiva.

El fondo genético del material analizado con SSR y SNP, generó el mismo número de grupos. Sin embargo, las agrupaciones de las accesiones son distintas con estos marcadores. La agrupación de las accesiones del material chileno mediante SSR, tendió a ser por tipo de grano, lo cual ha sido reportado con anterioridad en otros germoplasmas de arroz. Ello se podría deber a que algunos SSR podrían estar asociados con regiones del genoma que determinan el tamaño del grano. Estos marcadores SSR podrían ser de gran utilidad para la selección temprana, considerando que el tamaño del grano es uno de los principales criterios para determinar la estructura del germoplasma de arroz y la calidad comercial del mismo, lo que también se observó cuando se analizaron sólo las variedades comerciales. En cambio, con SNP no hubo una agrupación relacionada con el tipo de grano. Ello indica que la selección de uno u otro marcador molecular debe estar relacionado con el objetivo del estudio.

El alto número de grupos identificados por ambos marcadores indica que el material genético del PMGA, pese a ser clasificado como *japonica* templado, tiene un alto grado de introgresiones provenientes de otro tipo de germoplasma, posiblemente producto de las numerosas introducciones y cruzas reiteradas en el PMGA.

Referencias

Agrama, H.A., Eizenga, G.C. 2008. Molecular diversity and genome-wide linkage disequilibrium patterns in a worldwide collection of *Oryza sativa* and its relatives. Euphytica 160:339-355.

Arai-Kichise, Y. 2011. Discovery of genome-wide DNA polymorphisms in a landrace cultivar of *japonica* rice by whole-genome sequencing. Plant Cell Physiol. 52:274-282.

Becerra, V., Paredes, M. 2000. Uso de marcadores bioquímicos y moleculares en estudios de diversidad genética. Agric. Técnica (Chile) 60:270-281.

Becerra, V., Paredes, M., Ferreira, M., et al. 2017. Assessment of the genetic diversity and population structure in temperate *japonica* rice germplasm used in breeding in Chile, with SSR markers. Chil. J. Agric. Res. 77:15-26.

Becerra, V., Paredes, M., Gutiérrez, E., et al. 2015. Genetic diversity, identification, and certification of Chilean rice varieties using molecular markers. Chil. J. Agric. Res. 75:267-274.

Bonow, S., Von Pinho, V.R., Vieira, G.C., et al. 2009. Microsatellite markers in and around rice genes: Applications in variety identification and DUS testing. Crop Sci. 48:880-886.

Brondani, C., Oliveira, T., Hideo, P., et al. 2006. Determination of genetic variability of traditional varieties of Brazilian rice using microsatellite markers. Genet. Mol. Biol. 29:676-684.

Caicedo, A.L., Williamson, S.H., Hernández, R.D., et al. 2007. Genome-wide patterns of nucleotide polymorphism in domesticated rice. PLoS Genet. 3:1745-1756.

Chuang, H., Lur, H.S., Hwu, K.K., et al. 2011. Authentication of domestic Taiwan rice varieties based on fingerprinting analysis of microsatellite DNA markers. Bot. Stud. 52:393-405.

Courtois, B., Frouin, J., Greco, R., et al. 2012. Genetic diversity and population structure in a European collection of rice. Crop Sci. 52:1663-1675.

Cuevas-Pérez, F., Guimaraes, E., Berrio, L., et al. 1992. Genetic base of irrigated rice in Latin America and the Caribbean, 1971 to 1989. Crop Sci. 32:1054-1059.

Didlay, R. 1990. Contribution of ancestral lines in the development of new cultivars of rice. Crop Sci. 30:905-911.

Evanno, G., Regnaut, S., Goudet, J. 2005. Detecting the number of clusters of individuals using software structure: a simulation study. Mol. Ecology 14:2611-2620.

Feltus, F.A., Wan, J., Schulze, S.R., et al. 2004. An SNP resource for rice genetics and breeding based on subspecies *indica* and *japonica* genome alignments. Genome Res. 14:1812-1819.

Garris, A.J., Tai, T.H., Coburn, J., et al. 2005. Genetic structure and diversity in rice *Oryza sativa* L. Genetics 169:1631-1638.

Gonzaga, Z., Aslam, K., Septiningsih, E., et al. 2015. Evaluation of SSR and SNP markers for molecular breeding in rice. Plant Breed. Biotech. 3:139-152.

Guimarães, E. 2002. Genetic diversity of rice production in Brazil. p. 11-35. In Nguyen, V.N. (ed.) Genetic diversity in rice. Case studies from Brazil, India and Nigeria. FAO, Rome, Italy.

He, Z., Xie, F., Chen, L., et al. 2012. Genetic diversity of tropical hybrid rice germplasm measured by molecular markers. Rice Sci. 19:193-201.

Huang, R., Jian, L., Zheng, J., et al. 2013. Genetic bases of rice grain shape: so many genes, so little known. Trends Plant Sci. 18:218-226.

Islam, M.M., Hoque, M.E., Rabbi, S.M.H.A., et al. 2011. DNA Fingerprinting and diversity analysis of BRRI hybrid varieties and their corresponding parents. Plant Tissue Cult. Biotechnol. 21:189-198.

Jamil, M., Rana, I.A., Ali, Z., et al. 2013. Estimation of genetic diversity in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes using Simple Sequence Repeats. Mol. Plant Breed. 36:285-291.

Jin, L., Lu, Y., Xiao, P., et al. 2010. Genetic diversity and population structure in a diverse set of rice germplasm for association mapping. Theor. Appl. Genet. 121:475-487.

Kanawapee, N., Sanitchon, J., Srihaban, P., et al. 2011. Genetic diversity analysis of rice varieties (*Oryza sativa* L.) differing in salinity tolerance based on RAPD and SSR markers. Electron. J. Biotechnol. 14:1-14.

Kaneda, C. 1985. Development of very high yielding rice varieties. Farm. Japan 19:25-29.

Kishor, D., Seo, J., Chin, J., et al. 2020. Evaluation of whole-genome sequence, genetic diversity, and agronomic traits of Basmati rice (*Oryza sativa* L.). Front. Genet. 11:86.

Kumari, A.K., Dugarani, V.C., Vanisree, S., et al. 2011. Molecular fingerprinting of the elite, fine-grain type rice variety, Samba Mahsuri (BPT 5204) and assessment of genetic purity in seed-lots of the variety using SSR markers. Int. J. Sci. Res. 1:1-16.

Leung, H., Raghavan, C., Zhou, B., et al. 2015. Allele mining and enhanced genetic recombination for rice breeding. Rice 8:34.

Li, W., Cerise, J., Yang, Y., et al. 2017. Application of T-SNE to human genetic data. J. Bioinform. Comput. Biol. 15:1750017.

Liakat-Ali, M., McClung, A.M., Jia, M.H., et al. 2011. A rice diversity panel evaluated for genetic and agro-morphological diversity between subpopulations and its geographic distribution. Crop Sci. 51:2021-2035.

Lipitan, V., Brar, D.S., Abe, T., et al. 2007. Assessment of genetic diversity of Philippine rice varieties carrying good quality traits using SSR markers. Breed. Sci. 57:263-270.

Liu, D., Wang, J., Wang, X. et al. 2015. Genetic diversity and elite gene introgression reveal the *japonica* rice breeding in northern China. J. Integr. Agric. 14:811-822.

Lu, H., Redus, M.A., Coburn, J.R., et al. 2005. Population structure and breeding patterns of 145 US rice cultivars based on SSR markers analysis. Crop Sci. 45:66-76.

McCouch, S.R., Teytelman, L., Xu, Y., et al. 2002. Development and mapping of 2240 new SSR markers for rice. DNA Res. 9:199-207.

McCouch, S.R., Zhao, K., Wright, M., et al. 2010. Development of genome-wide SNP assay for rice. Breed. Sci. 60:524-535.

McInnes, L., Healy, J., Astels, S. 2017. Hdbscan: Hierarchical density based clustering. J. Open Source Softw. 2:205.

McNally, K.L., Childs, K.L., Bohnert, R., et al. 2009. Genomewide SNP variation reveals relationships among landraces and modern varieties of rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106:961-967.

Montalban, R., Destro, D., Silva, E., et al. 1998. Genetic base of Brazilian upland rice cultivars. J. Genet. Breed. 52:203-209.

Mvuyekure, S., Sibiya, J., Derera, J., et al. 2018. Assessment of genetic diversity of rice based on SNP markers for selection of parents for sheat rot (*Sarocladium oryzae*) resistance breeding. S. Afr. J. Plant Soil 35:51-59.

Nasu, S., Suzuki, J., Ohta, R., et al. 2002. Search and for analysis of single nucleotide polymorphisms (SNP) in rice (*Oryza sativa*, *Oryza rufipogon*) and establishment of SNP markers. DNA Res. 9:163-171.

Ndjiondjop, M., Semagn, S., Sow, M., et al. 2018. Assessment of genetic variation and population structure of diverse rice genotypes adapted to lowland and upland ecologies in Africa using SNPs. Front. Plant Sci. 9:446.

Ni, J., Colowit, P.M., Mackill, D.J. 2002. Evaluation of genetic diversity in rice subspecies using microsatellite markers. Crop Sci. 42:601-607.

Paredes, M., Becerra, V., Vega, A. 2015. Variedades tradicionales desarrolladas y recomendadas. p. 37-39. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de Producción de Arroz: Buenas Prácticas Agrícolas (BPA). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 100p.

Park, J., Yang, W., Kwon, Y. et al. 2019. Assessment of the genetic diversity of rice germplasm characterized by black-purple and red pericarp color using Simple Sequence Repeat markers. Plants 8:471.

Pina-Martins, F., Silva, D., Fino, J., et al. 2017. Structure_threader: An improved method for automation and parallelization of programs Structure, fastStructure and MavericK on multicore CPU Systems. Mol. Ecol. Res. 17(6):e268-e274.

Pritchard, J. K., Stephens, M., Donnelly, P. 2000. Inference of population structure using multilocus genotype data. Genetics 155:945-959.

Rahman, M.S., Sohag, M.K.H., Rahman, L. 2010. Microsatellite based DNA fingerprinting of 28 local rice (*Oryza sativa* L.) varieties of Bangladesh. J. Bangladesh Agric. Univ. 8:7-17.

Reig-Valiente, J., Viruel, J., Sales, E., et al. 2016. Genetic diversity and population structure of rice varieties cultivated in temperate regions. Rice 9:58. Doi:10.1186/s12284-016-0130-5.

Tam, N.T., Dwiyanti, M.S., Koide, Y., et al. 2019. Profiling SNP and nucleotide diversity to characterize Mekong Delta rice landraces in Southeast Asian populations. Plant Genome 12:190042.

Thomson, M.J. 2014. High-throughput SNP genotyping to accelerate crop improvement. Plant Breed. Biotechnol. 2:195-212.

Wang, W., Maulen, R., Hu, Z., et al. 2018. Genomic variation in 3,010 diverse accessions of Asian cultivated rice. Nature 557:43.

Xin, Y., Zhang, Z., Xiong, Y., et al. 2005. Identification and purity test of super hybrid rice with SSR molecular markers. Rice Sci. 12:7-12.

Xu, Y., Beachel, H., McCouch, S. 2004. A marker-based approach to broadening the genetic base of rice in the USA. Crop Sci. 44:1947-1959.

Yamamoto, T., Nagasaki, H., Yonemaru, J., et al. 2010. Fine definition of the pedigree haplotypes of closely related rice cultivars by means of genome-wide discovery of single-nucleotide polymorphisms. BMC Genomics 11:267.

Yan, W.G., Agrama, H., Jia, M., et al. 2010. Geographic description of genetic diversity and relationships in the USDA rice world collection. Crop Sci. 50:2406-2417.

Zeng, Y., Zhang, H., Li, Z., et al. 2007. Evaluation of genetic diversity of rice landraces (*Oryza sativa* L.) in Yunnan, China. Breed. Sci. 57:91-99.

Zhang, H.D., Zhang, M., Wang, M., et al. 2011. A core collection and mini core collection of *Oryza sativa* L. in China. Theor. Appl. Genet. 122:49-61.

Zhu, Y., Qin, G., Hu, J., et al. 2012. Fingerprinting and variety identification of rice (*Oryza sativa* L.) based on simple sequence repeat markers. Seed Science Center, College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, China. Plant Omics J. 5:421-426.

Zhu, Q., Zheng, X., Luo, J., et al. 2007. Multilocus analysis of nucleotide variation of *Oryza sativa* and its wild relatives: severe bottleneck during domestication of rice. Mol. Biol. Evol. 24:875-888.

SECCIÓN II.
CLIMA Y SUELO

Capítulo 4. Clima de las zonas productoras de arroz en el mundo

Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G., Claudia Marchesi G.

La distribución de los organismos vivos, como plantas y animales, es influenciada fuertemente por las condiciones climáticas (Aguirre-Gutiérrez et al., 2015). En el caso específico del arroz (*Oryza sativa* L.), éste ha logrado adaptarse a una gran cantidad de ambientes, con diferentes condiciones climáticas. Las principales restricciones climáticas asociadas a la productividad del cultivo del arroz en el mundo son la temperatura y la radiación solar (Fahad et al., 2019). El arroz es un cultivo de origen tropical y, por ello, normalmente requiere de temperaturas que varíen entre 20 y 35 °C durante gran parte de su desarrollo (Cuadro 1) (Yoshida, 1981). Sin embargo, existen excepciones en donde la planta de arroz ha logrado adaptarse a condiciones de bajas temperaturas en diversas regiones del planeta. De las dos principales subespecies de arroz existentes, la subespecie *japonica* logra desarrollarse exitosamente en climas templados como el norte de China, Japón, Corea y Chile, permitiendo que el cultivo se desarrolle fuera de zonas tropicales o subtropicales, donde se desarrolla comúnmente el arroz de la subespecie *indica* (Takahashi, 1984).

Temperaturas inferiores a 15 °C tienen efectos negativos para el cultivo del arroz. El nivel de daño causado por este estrés depende del tiempo de exposición, intensidad del estrés y de la etapa del desarrollo en que se encuentre el arroz (Howarth y Ougham, 1993; Fujino et al., 2004; Díaz et al., 2006). Posterior a la siembra, las bajas temperaturas pueden causar una menor tasa de germinación (da Cruz et al., 2006), una disminución del contenido de clorofila en la etapa de plántula (Aghaee et al., 2011) e inhibición de la fotosíntesis (Allen y Ort, 2001; Díaz et al., 2006; Suzuki et al., 2008), induciendo un estrés oxidativo. Lo anterior afecta el vigor de las plantas (da Cruz et al., 2006), produciéndose, en algunos casos, clorosis y lesiones irreversibles en las hojas (Andaya y Mackill, 2003; Suzuki et al., 2008). Durante la etapa reproductiva, las bajas temperaturas pueden generar esterilidad floral en la panícula, lo que resulta en una menor producción y rendimiento de grano (Shimono et al., 2007).

Cuadro 1. Temperaturas críticas y óptimas para el desarrollo del cultivo del arroz.

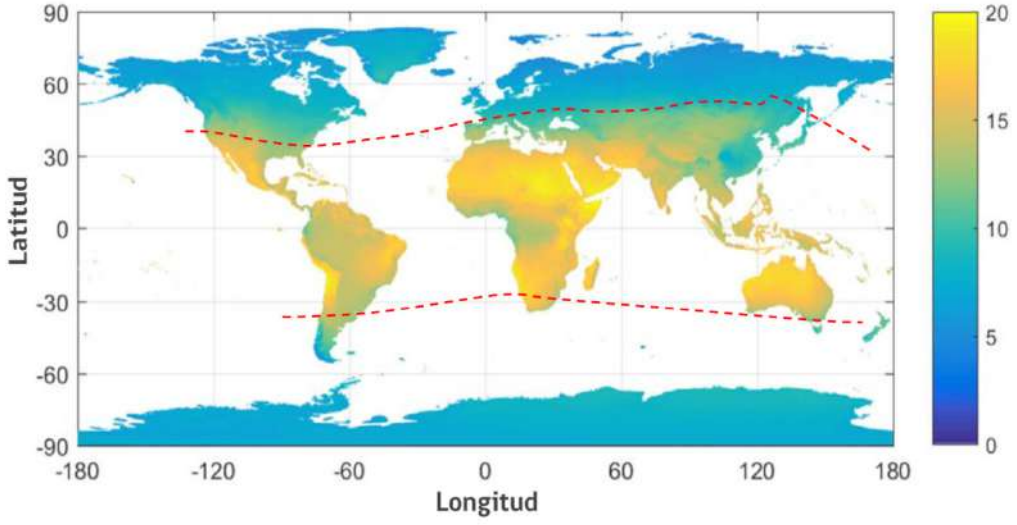
Estado de desarrollo	Temperatura media crítica (°C)		Temperatura media óptima (°C)
	Baja	Alta	
Germinación	10	45	20-35
Plántula	12-13	35	25-30
Macolla	9-16	33	25-31
Iniciación de panícula	15	-	-
Diferenciación de panícula	15-20	38	-
Antesis	22	35	30-33
Madurez	12-18	30	20-25

Fuente: adaptado de Yoshida (1981).

Otra restricción importante para el cultivo del arroz en el mundo es la radiación solar. En general, las plantas tienen la capacidad de utilizar sólo parte del total del espectro electromagnético que entrega el sol, la que corresponde a la radiación fotosintéticamente activa (Mottus et al., 2013). Esta radiación (400 y 700 nm) contribuye al crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas y es absorbida por la clorofila a, b y carotenoides presentes en la planta (McCree, 1972a; 1972b). La

radiación fotosintéticamente activa es expresada en términos de densidad de flujo de fotones fotosintéticos (µmol fotones s^{-1} m^{-2}). Por otro lado, la cantidad de radiación absorbida depende de la especie, estado de desarrollo, lugar geográfico, disponibilidad de agua, nutrición, ángulo de incidencia de la radiación, entre otras (Campillo et al., 2012; Gautam et al., 2019). En el caso específico del arroz, la cantidad de radiación disponible para los procesos fotosintéticos depende, principalmente, de la ubicación geográfica del cultivo y se asocia con la presencia de nubes que limitan el acceso a esta radiación, en especial en zonas húmedas. Los requerimientos de radiación solar para el cultivo del arroz son mayores en la medida que la planta avanza en su estado de desarrollo. De esta manera, en términos de radiación total, una planta de arroz en estado vegetativo necesita diariamente entre 100 y 400 cal cm^{-2}. En cambio, una planta en etapa reproductiva y llenado de grano, necesita entre 500 y 600 cal cm^{-2} por día para lograr rendimientos en grano óptimos (Yoshida, 1981).

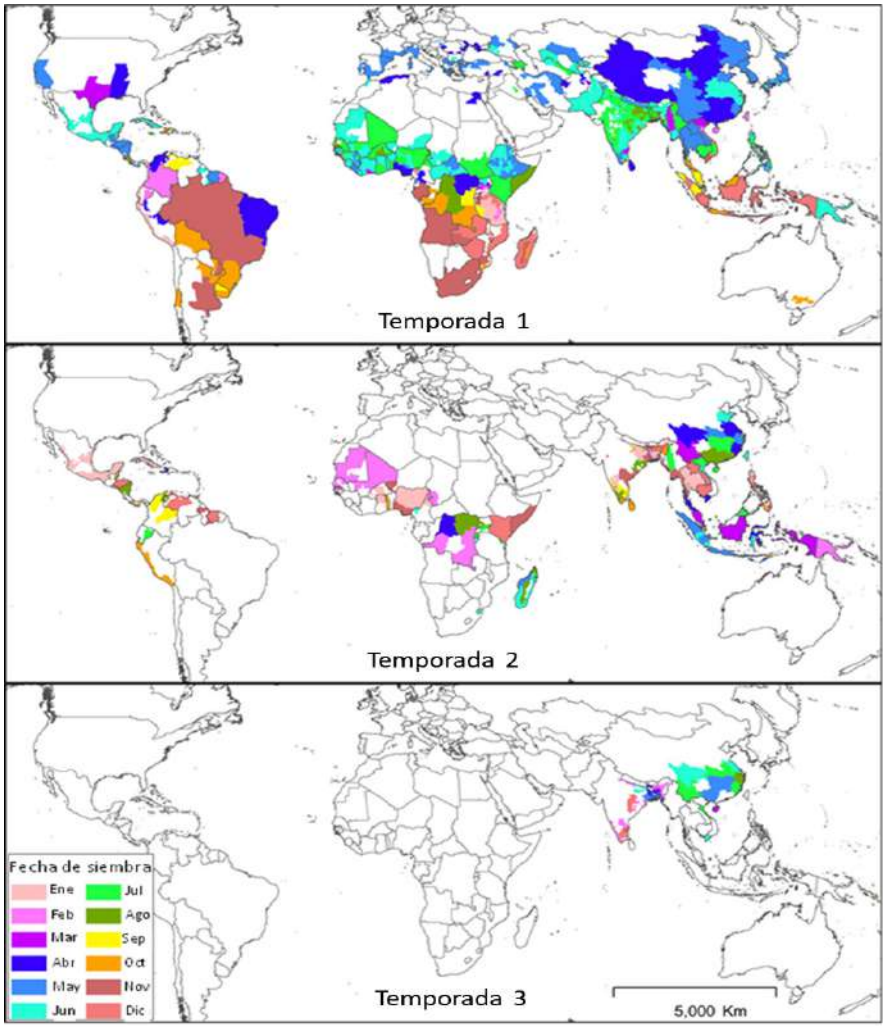
En general, las zonas agroclimáticas donde el arroz se desarrolla presentan los mejores niveles de radiación fotosintéticamente activa con valores entre 10 y 20 kmoles de fotones m^{-2} $año^{-1}$ (Figura 1). Considerando la radiación total, se ha reportado que la radiación promedio diaria disponible en los países con clima mediterráneo como Chile, Australia y U.S.A., es 100 cal cm^{-2} por día, mayor que en países con clima monzónico tropical (FAO, 1998).



Fuente: Ryu et al., 2000.

Figura 1. Radiación fotosintéticamente activa anual. Los colores corresponden a la escala en kmol fotones m^{-2} $año^{-1}$. Las líneas rojas discontinuas corresponden a los límites latitudinales norte y sur, en donde el cultivo del arroz se desarrolla.

Considerando los diferentes climas presentes en nuestro planeta, se ha relacionado las fechas de siembra y diferentes temporadas con los niveles de producción de arroz en el mundo (Laborte et al., 2017). De esta manera, la temporada 1 representa la mayor producción de arroz, la temporada 2 una producción intermedia y la temporada 3, una producción baja (Figura 2). De la figura también se puede deducir que existen regiones con más de una producción de arroz al año y otras que solamente tienen una sola temporada como Australia, Uruguay, Argentina, U.S.A. y Chile.



Fuente: Laborte et al., 2017.

Figura 2. Temporadas del cultivo de arroz con diferentes niveles de rendimiento en grano. Los colores en la figura representan el mes en el cual se desarrollan las labores relacionadas con el inicio del cultivo del arroz en las diferentes regiones del mundo. La temporada de mayor rendimiento corresponde a la 1 y la de menor rendimiento a la 3.

Si bien, más del 75 % del arroz cultivado proviene de regiones con clima tropical (entre Trópico de Cáncer y Capricornio), también puede ser cultivado en climas secos, templados y templados fríos. En el mundo, el cultivo del arroz se realiza entre el río Amur, en la frontera entre Rusia y China (53 ° N; Patra et al., 2016) y la localidad de San Nicolás, en la zona central de Chile (36 ° S; Donoso et al., 2014), cuya clasificación climática está bien caracterizada (Figura 3). En ese contexto, se han realizado diversos esfuerzos para fijar la ubicación agroclimática del cultivo del arroz. Es así como una herramienta desarrollada por la Universidad de Wageningen, el Instituto Water for Food de la Universidad de Nebraska y la Universidad de Nebraska, denominada Global Yield Gap Atlas (GYGA), ha permitido determinar las brechas asociadas a la producción de arroz, ubicándolas geográficamente, además de zonificarla para conocer el contexto climático en el cual se desarrolla este cultivo en el mundo (de Groot, 2015). Fruto de ello, se generaron mapas que consideran la producción mundial de arroz y su ubicación (Figura 4).

Es importante destacar que, del total de la superficie mundial dedicada al cultivo del arroz, sólo una pequeña fracción se desarrolla fuera de los trópicos de cáncer y capricornio, como en el caso

del norte de China, Japón, Corea, Italia, Rusia y Kazajistán por el norte, y Chile, Sur de Brasil, Uruguay, Argentina, y Australia por el sur.

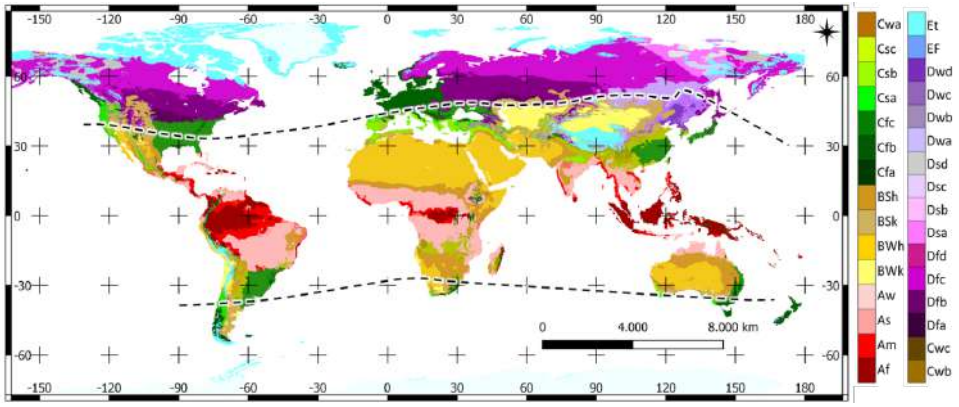


Figura 3. Clasificación de climas según Köppen-Geiger. La línea discontinua de color negro corresponde al límite sur y norte donde se cultiva el arroz en el mundo, respectivamente. **Clima A**: Tropical (Af: Ecuatorial; Am: Monzónico; As: Sabana (verano seco); Aw: Sabana (invierno seco)), **Clima B**: Seco (Árido y Semiárido)(BS: Estepario; BSh: Estepario cálido; BSk: Estepario frío; BW: Desértico; BWh: Desértico cálido; BWk: Desértico frío), **Clima C**: Templado/Mesotermal (Cf: Precipitaciones constantes (Cfa: Verano cálido; Cfb: Verano suave; Cfc: Verano frío); Cs: Verano seco (Csa: Verano cálido; Csb: Verano suave; Csc: Verano frío); Cw: Invierno seco (Cwa: Verano cálido; Cwb: Verano suave; Cwc: Verano frío)), **Clima D**: Templado frío/Continental/Microtermal (Df: Precipitaciones constantes (Dfa: Verano cálido; Dfb: Verano suave; Dfc: Verano frío; Dfd: Invierno muy frío); Ds: Verano seco (Dsa: Verano cálido; Dsb: Verano suave; Dsc: Verano frío; Dsd: Verano muy frío; Dw: Invierno seco; Dwa: Verano cálido; Dwb: Verano suave; Dwc: Verano frío; Dwd: Verano muy frío)), **Clima E**: Polar y de alta montaña (ET: Tundra; EF: Hielo; EB: Alta montaña) (Adaptado: Kottek et al., 2006).

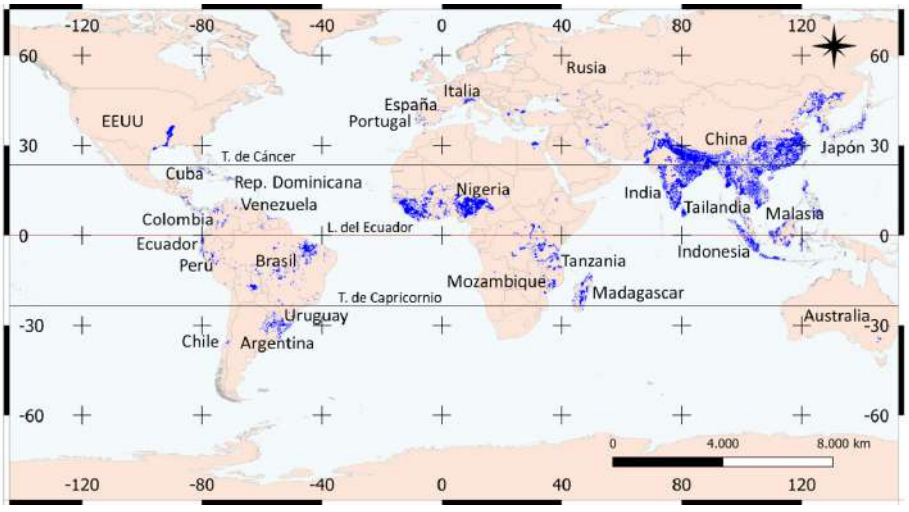


Figura 4. Distribución del cultivo del arroz en el mundo. En color azul se muestran los países productores. Se reunió en una sola imagen, la presencia de arroz de riego y secano en el mundo. En el mapa se indican algunos de los países que producen arroz en el mundo. Además, se representan como líneas continuas, el Trópico de Cáncer (T. de Cáncer), Línea del Ecuador (L. del Ecuador) y Trópico de Capricornio (T. de Capricornio) (Adaptado: de Groot, 2015).

Diferentes regiones agroclimáticas del mundo

A nivel mundial, el arroz es cultivado bajo diversas condiciones climáticas, donde las principales restricciones para su desarrollo son las altas o bajas temperaturas y la radiación solar. A continuación, se describe gran parte de la variabilidad climática en la que el arroz se desarrolla.

Asia

En el continente asiático, el arroz está distribuido en el este, sur, sudeste y centro de Asia. Los principales países productores de arroz en este continente, en orden de relevancia, son China (28 %), India (22 %), Indonesia (10 %), Bangladesh (7 %), Vietnam (6 %), Tailandia (5 %), Myanmar (4 %), Filipinas (2,5 %), Japón (1,5 %), Camboya (1,3 %) y Pakistán (1 %) (Bandumula, 2018), en donde se cultiva el arroz en condiciones de riego y de secano. Los once países asiáticos contribuyen, en un 88 %, a la producción mundial de arroz, mientras que ocho de esos países aportan el 35 % del total de exportaciones de arroz en el planeta. Considerando que el 37 % de la población mundial se concentra en China e India, ellos contribuyen con cerca del 50 % de la producción global de arroz.

Este de Asia

China

En China la producción de arroz corresponde a una parte importante de su actividad económica, Lo que también representa el 28 % de la producción mundial. Los principales climas presentes en China corresponden a templado de tierras altas (sobre 1000 ms.n.m.), templado continental, subtropical húmedo, templado estepa y semiárido, templado desértico y árido, y tropical húmedo. En China, el cultivo del arroz se extiende desde Mohe (53°27´ N), provincia de Heilongjiang en el norte, con altitud de hasta 2695 ms.n.m, hasta Sanya (18°09´ N) provincia de Hainan en el sur. En general, se siembra arroz *japonica* en el norte y arroz tipo *indica* en el sur, además de otros tipos de arroces como los aromáticos y glutinosos (FAO, 2002).

Región noreste. Es la zona de producción del arroz ubicada al extremo norte del mundo, precisamente en Mohe (53°27´ N), provincia de Heilongjiang. Incluye a las provincias de Heilongjiang, Jilin y parte de Liaoning y del interior Mongolia. Es la zona más importante en producción de arroz *japonica* de China, caracterizada por una acumulación anual de temperaturas que oscila entre los 2.000 y 3.700 °C (base 10 °C); 2.200 a 3.100 horas de luz solar por año y 350 a 1.100 mm de precipitaciones durante el desarrollo del cultivo (Tang et al., 2010). La zona produce sólo una cosecha al año, correspondiente a un arroz de período corto de desarrollo. Es un cultivo de verano que es trasplantado entre abril y junio, y cosechado entre septiembre y octubre (7 % de la producción). Esta zona es la más afectada por las bajas temperaturas de China, al pertenecer a un clima templado y frío. Los veranos son más lluviosos que los inviernos. En la Figura 5A se representa el climograma de la ciudad de Jamusi, ubicada en la provincia de Heilongjiang. Esta localidad presenta un clima, según Koppen Geirger, templado frío y con verano seco y cálido (Dwa). Se puede observar que, debido a temperaturas bajas durante el invierno, cercanas a -20 °C, la única ventana para el establecimiento del cultivo en esta zona, está entre mayo y septiembre.

Región noroeste. En ella se practica el cultivo de arroz de secano y una cosecha al año. Incluye a las provincias de Xinjiang, Ningxia, parte de Gansu y del interior de Mongolia, además del norte de Qinghai, Shanaxi, Hebei y Liaoning. Es la zona más seca de China, debido a las bajas precipitaciones (150-200 mm al año). El arroz se siembra alrededor de los ríos y en pequeñas superficies (Tang et al., 2010).

Región norte. Se practica el cultivo de arroz *japonica* de riego, el que es provisto por ríos y bombas de riego, con algunas siembras de secano, donde no hay disponibilidad de agua. Se trata de una zona delimitada por la montaña Qinling, el río Amarillo en el sur, la Gran Muralla por el norte y la provincia de Shaanxi por el oeste. Incluye a las provincias de Beijing, Tianjing y Shandong y partes de Henan, Hebei, Shanxi, Shaanxi, Jiansu y Anhui. Zona de altas temperaturas y humedad en el verano producto de los monzones, y de bajas temperaturas en la primavera y otoño. Posee una acumulación anual de temperaturas de 4.000 a 5.000 °C (base 10 °C), con 2.000 a 3.000 horas de sol anuales y 580 a 1.000 mm de precipitaciones por año (Tang et al., 2010). El periodo del cultivo en la zona norte se extiende desde mayo-junio a agosto-septiembre (FAO, 2002).

Región central. Esta región es la más importante en producción de arroz, pudiendo obtenerse una o dos cosechas al año. Se extiende desde la costa este hasta las planicies de Chengdu en el oeste, y desde la montaña Nanling en el sur hasta el río Huai en el norte. Incluye las provincias de Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Jianmgxi, Hunan, Hubei, Sichuan y los alrededores de Shanghai y Chongqing a lo largo del río Yangtze (Tang et al., 2010). Esta zona posee un clima subtropical, caluroso y húmedo, con presencia de monzones. El cultivo puede durar entre 210 a 260 d, con presencia de 4.500 a 6.500 °C acumulados por año, 700 a 1.500 horas de sol y 700 a 1.600 mm de precipitaciones. Se cultiva arroz tipo *indica*, *japonica* y glutinoso, con una alta presencia de híbridos tipo *indica*.

Región sur (este). Es una región donde se pueden obtener dos cosechas de arroz tipo *indica* al año. Incluye el sur de Guangdong, Guangxi, Fujian y Guizhou, además de Taiwán y Hainan. Posee un largo período de crecimiento de la planta, con acumulación anual de temperaturas de entre 5.800 y 9.300 °C, 1.000 a 1.800 horas de sol anual y 700 a 2.000 mm de precipitaciones anuales (Tang et al., 2010). El período de siembra a cosecha se extiende desde marzo-julio a junio- noviembre (FAO, 2002). Entre la zona centro sur de China, la ciudad de Guigang en la provincia de Guangxi (Figura 5B) y la Isla de Hainan (Figura 5C), poseen un clima templado con precipitaciones constantes y veranos cálidos (Cfa). En ambas localidades, no existen grandes diferencias en precipitaciones, aunque sí tienen diferencias en las temperaturas medias durante el período del cultivo.

Región suroeste. En esta región se pueden obtener uno o dos cultivos al año. Incluye a las provincias de Hunan, Guizhou, Guangxi, Qinghai, Yunnan, Sichuan y Tibet, incluyendo las planicies de Yungui y Quinzang. En la planicie de Yungui se produce arroz indica bajo 1.400 m s.n.m. y arroz *japonica* sobre 1.800 m s.n.m. En la zona intermedia, entre 1.800 y 1.400 m s.n.m. se cultivan arroces *indica* y *japonica,* y arroz de secano en las zonas montañosas y pendientes de las colinas. En la región se puede producir un cultivo en las zonas más templadas y dos cultivos en las zonas bajas que son calurosas y húmedas (Tang et al., 2010). Debido a las diferencias de altura de los campos de arroz, las temperaturas diurnas y nocturnas presentan una amplia variabilidad. El clima es principalmente subtropical, caluroso y húmedo en las partes bajas. El período disponible para el cultivo es de 180 a 210 d, con una acumulación anual de temperaturas de 2.900 a 8.000 °C, 800 a 1.500 horas de sol al año y 500 a 1.400 mm de precipitaciones anuales (Tang et al., 2010). En Yunnan, el periodo del cultivo se extiende desde marzo a septiembre (FAO, 2002). La producción de arroz comienza en febrero a lo largo del río Yangtze y en las provincias del sur se trasplanta entre febrero y abril. La cosecha se presenta entre junio y julio. Posteriormente, se realiza un trasplante entre marzo y junio en el sureste y a lo largo del río Yangtze, y se cosecha entre octubre y noviembre. Un trasplante tardío es realizado posterior a la cosecha de la siembra de principios de año, dando origen a una cosecha entre octubre y noviembre.

Japón

Japón cuenta con un clima con las cuatro estaciones bien marcadas (primavera, verano, otoño e invierno) (Washio, 2013), con áreas principalmente subtropicales y templadas (Ricepedia, 2020).

El período de siembra a cosecha en el norte de Japón varía desde mayo-junio a septiembre-octubre; en la zona central desde abril-mayo a agosto–octubre y en la zona sur de abril-mayo a agosto-septiembre (FAO, 2002). La principal metodología de cultivo del arroz es el trasplante. El arroz se cultiva en todo el país, con la mayor producción concentrada en la isla de Hokkaido. Una de las principales ciudades productoras en Hokkaido es Sapporo, la cual cuenta con un clima frío y templado. Según Köppen y Geiger, su clima se clasifica como Dfa. La temperatura media de esta ciudad es de 8,2 °C y la precipitación anual es de 1.153 mm (Figura 5D). Mayo es el mes más seco, con cerca de 58 mm de precipitaciones, mientras que el mes más lluvioso es agosto con cerca de 160 mm.

Sur de Asia

India

El arroz es uno de los principales granos producidos en India. Este país tiene una gran superficie cultivada, principalmente bajo climas cálidos y húmedos, en sectores que tienen gran aporte de precipitaciones anuales (> 1.000 mm), por lo que el cultivo se desarrolla sin riego. Hay otros sectores con menos precipitaciones donde el arroz es irrigado. La principal metodología para el cultivo del arroz en la India es el trasplante.

El arroz es cultivado en tierras altas (menor disponibilidad de agua) o tierras bajas (alta disponibilidad de agua). Se presentan tres períodos de cultivo: marzo-mayo a junio-octubre; junio-octubre a noviembre-febrero; noviembre febrero a marzo-junio (FAO, 2002).

El arroz se cultiva en los estados de Uttar Pradesh, West Bengal, Andhra Pradesh, Punjab, Orissa, Bihar, Madhya Pradesh, Tamil Nadu, Haryana y Assam (Mahajan et al., 2017). Los climogramas representan climas característicos de la zona arrocera de India (Figura 5E y 5F), con temperaturas promedio que pueden superar 30 °C y precipitaciones más abundantes en Kumbakonam en el estado de Tamil Nadu (Clima Tropical; Aw) que en la ciudad de Gohana en el estado de Haryana (Clima Seco; BSk).

Sudeste de Asia

Tailandia

En Tailandia el arroz se cultiva en todo el país. Sin embargo, el 50 % se concentra en la zona norte, aunque es en la zona central donde se producen los mayores excedentes. El principal sistema de cultivo es el trasplante en el arroz de riego y secano en suelos bajos. En la zona central se usa principalmente el sistema inundado con de semilla pre-germinada (FAO, 2002). El clima es principalmente tropical, con menores incidencias de precipitaciones en invierno en comparación con el verano (Figura 5G). Según la clasificación de Köppen Gieger el clima corresponde a Aw, con temperaturas promedio de 27,1 °C y precipitaciones anuales de 1.582 mm. El mes más seco es enero con 1 mm, mientras que la mayor parte de las precipitaciones ocurren en agosto con un promedio de 320 mm.

Asia Central

Kazajistán

Una de las localidades productoras de arroz en Kazajistán es Kyzylorda. Esta localidad presenta escasas precipitaciones anuales (151 mm; Figura 5H). De acuerdo con Köppen y Geiger el clima se clasifica como seco y desértico frío (BWk). El mes más seco es septiembre con sólo 3 mm de precipitación. En abril, la precipitación alcanza su máximo, con un promedio de 20 mm. Las temperaturas promedio están entre -8 °C en el mes de enero y 27,7 °C en el mes de julio.

América

Si bien América no corresponde a uno de los principales productores de arroz en el mundo, la diversidad de climas presentes hace interesante su mención en este trabajo. Con ello, se pretende conocer y contrastar los diferentes climas en los que este cultivo se desarrolla. La superficie arrocera de América corresponde a 7,2 millones de ha en diferentes condiciones edafoclimáticas (Haefele et al., 2014), con presencia de arroz irrigado y de secano. Brasil y U.S.A. concentran más del 60 % de la producción en el continente, con una producción de 12 y 10 millones de toneladas, respectivamente. Le siguen Perú con 2,8 millones t, Colombia con 2 millones, Argentina con 1,6 millones, Uruguay con 1,4 millones y Ecuador con 1,1 millones. Bajo 1 millón t están Guyana, Paraguay, Venezuela, Nicaragua, Bolivia, México, Panamá, Surinam, Costa Rica, Chile, Honduras, Guatemala y El Salvador.

América del Sur

Uruguay

Uruguay se encuentra entre los 30° y 35° de latitud sur, con un clima subtropical a templado, sin grandes fluctuaciones de temperatura y precipitaciones durante el año. La precipitación media anual oscila entre 1.200 mm (suroeste) y 1.600 mm (noreste). La temperatura media es de 17,7 °C que oscila entre 19,8 °C (norte) y 16,6 °C (sur). Las temperaturas medias mínimas y máximas alcanzan los 12,9 °C y 22,6 °C, respectivamente. Los registros de temperaturas más altas corresponden a enero y los más bajos a julio (Castaño et al., 2011). El arroz se cultiva mayoritariamente mediante siembra mecanizada, directa y al voleo. La fecha de siembra es entre fines de septiembre y noviembre, siendo la época óptima de siembra a principios de octubre. La fecha de cosecha es en marzo- abril.

La localidad arrocera de Bella Unión, al norte de Uruguay, tiene un clima cálido y templado (Figura 5I). De acuerdo con Köppen y Geiger su clima se clasifica como Cfa. La temperatura media anual es de 19,6 °C y las precipitaciones anuales son de 1.366 mm. El mes más seco es agosto con 66 mm y el más lluvioso es abril con 147 mm. El mes de enero es el más cálido con un promedio de 26,2 °C y julio es el mes más frío con temperaturas que promedian 13,7 °C. En el caso de la localidad de Treinta y tres, en la zona este de Uruguay, tiene un clima cálido y templado (Figura 5J), y según la clasificación de Köppen y Geiger, su clima también corresponde a una clasificación Cfa. La temperatura promedio anual es de 17,3 °C y la precipitación anual es de 1.241 mm. El mes más seco corresponde a diciembre con 88 mm y la mayor cantidad de precipitaciones ocurre en abril con 119 mm. Enero es el mes más cálido con temperaturas promedio de 23,7 °C. Por otro lado, las temperaturas mas bajas ocurren en julio con un promedio de 11,7 °C.

Brasil

La variedad de climas presente en Brasil permite realizar el cultivo del arroz en diferentes fechas dependiendo de la localidad. En el sur se realiza entre agosto y diciembre, cosechándose entre marzo y abril. En cambio, en el noreste se siembra entre marzo y mayo y se cosecha entre agosto y noviembre. Por otro lado, en el norte se siembra entre noviembre y diciembre y se cosecha entre abril y junio. En la zona norte el clima es cálido y húmedo con promedios de temperatura de 26 °C y entre 1.500 y 3.000 mm de precipitaciones. En el sur hay clima subtropical (Rio Grande do Sul) con inviernos secos y fríos y veranos húmedos y lluviosos. El sureste se caracteriza por inviernos suaves y veranos lluviosos con 18 a 24 °C de temperatura media y 900 a 4.400 mm de precipitaciones. Por ejemplo, en la localidad de Pelotas en Rio Grande del Sur el mes más seco es noviembre, con 70 mm (Figura 5K), mientras que la mayor parte de la precipitación cae en septiembre, promediando 139 mm. Según la clasificación de Köppen y Geiger, es un clima templado con veranos cálidos y precipitaciones constantes durante todo el año (Cfa). El mes más caluroso del año es enero con un promedio de 23,4 °C. El mes de julio es el más frío, con temperaturas que promedian 12,7 °C. La diferencia en precipitación entre el mes más seco y el más lluvioso es de 69 mm. A lo largo del año, las temperaturas varían en 10,7 °C. En otro ejemplo, en la ciudad de Formoso do Araguaia del Estado de Tocantis, la precipitación más baja ocurre en julio, con un promedio cercano a 0 mm, mientras que diciembre tiene las mayores precipitaciones del año (334 mm) (Figura 5L). Según la clasificación de Köppen y Geiger el clima es Tropical con inviernos secos (Aw). Las temperaturas medias varían durante el año en apenas 2,5 °C. En el caso de la ciudad de Vitoria do Mearim en Maranhao, el mes más seco es septiembre con 29 mm en promedio (Figura 5LL). Según la clasificación de Köppen y Geiger, este clima es similar al anterior (Aw). Gran parte de las precipitaciones se concentran entre enero y mayo. El mes más cálido es octubre con un promedio de 28 °C y junio presenta la temperatura más baja con 26,9 °C.

Chile

El cultivo del arroz en Chile se realiza principalmente mediante siembra de semilla pregerminada (80 %) y siembra directa (20 %). La fecha de siembra va desde fines de septiembre hasta noviembre, siendo ideal sembrar a mediados de octubre. La cosecha se realiza entre fines de marzo y mayo. El clima es principalmente mediterráneo de verano cálido (Csb) con una marcada estacionalidad. La temperatura media no sobrepasa 20 °C (Figura 5M) y las precipitaciones no exceden los 110 mm durante la temporada del cultivo.

América del Norte, Centro América y El Caribe

Estados Unidos

El arroz en U.S.A. es producido en dos sectores principalmente. En primer lugar y con la mayor producción están los estados de Arkansas, Louisiana, Mississippi y Texas, donde el arroz es sembrado entre abril y junio y cosechado entre agosto y septiembre. En segundo lugar se encuentra California, donde se siembra entre septiembre y noviembre y se cosecha entre abril y junio. La totalidad del arroz cultivado en U.S.A. corresponde a riego y los métodos de siembra se basan en el uso de semilla pre-germinada y siembra directa. A modo de ejemplo, la ciudad de Jonesboro del estado de Arkansas tiene un clima templado con veranos cálidos (Cfa), y la menor cantidad de lluvia ocurre en julio (Figura 5N), con un promedio de 78 mm. La mayor parte de la precipitación cae en mayo, promediando 130 mm. Las temperaturas son más altas en julio, con alrededor de 27,3 °C. Enero es el mes más frío, promediando 2,6 °C. La variación en precipitación entre los meses más seco y más húmedo es de 52 mm. A lo largo del año las

temperaturas varían en 24,7 °C. En el estado de Louisiana, la ciudad de Lake Charles posee un clima similar al anterior (Cfa). La menor cantidad de lluvia ocurre en marzo con 89 mm (Figura 5O) y la mayor en julio con 155 mm. Las temperaturas son más altas en promedio durante julio con alrededor de 27,8 °C. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en enero, cuando está alrededor de 10,1 °C. Hay una variación en precipitaciones de 66 mm entre los meses más secos y el más húmedo. Por otro lado, se observa una variación de 17,7 °C entre el mes más cálido y el más frío. En el estado de California la menor cantidad de lluvia ocurre en julio con un promedio de 1 mm (Figura 5P). Según la clasificación de Köppen y Geiger, el clima de esta zona arrocera corresponde a templado con veranos cálidos (Csa). La mayor cantidad de precipitación se aprecia en enero, con un promedio de 106 mm. Las temperaturas son más altas en julio, con un promedio de 23,8 °C. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en enero con 7,3 °C. La variación en precipitación entre el mes más seco y húmedo es de 105 mm y la variación en temperaturas durante todo el año es de 16,5 °C.

Centroamérica

Costa Rica

La principal zona arrocera de Costa Rica (Región de Chorotega) tiene un clima tropical (Köppen-Geiger: Aw), con inviernos más secos que en verano. La temperatura promedio es de 25,8 °C y las precipitaciones anuales alcanzan los 1.744 mm (Figura 5Q). El mes más seco es febrero, con 1 mm, mientras que durante el mes de agosto hay mayor presencia de precipitaciones, con 375 mm. Por otro lado, abril es el mes más caluroso, con una temperatura media de 27,4 °C y el más frío es diciembre con 24,7 °C.

Caribe

Cuba

Cuba posee un clima tropical (Köppen-Geiger: Aw), con dos fechas de siembra donde la principal forma de producir arroz es mediante trasplante y siembra directa. Los veranos son mucho más lluviosos que los inviernos. La temperatura media anual es 25,7 °C y las precipitaciones medias son de 1.148 mm anuales (Figura 5R).

África

En África, el arroz se cultiva en 40 países en una superficie cercana a los 10 millones de hectáreas. Dentro de los cinco principales países productores de arroz están Nigeria (1.895.697 ha), Madagascar (1.183.614 ha), Guinea (1.005.822 ha), Costa de Marfil (968.271 ha) y Tanzania (942.438 ha) (Diagne et al., 2013). Debido a diversas restricciones bióticas y abióticas, la producción de arroz de África sólo permite abastecer al 60 % de la demanda de la población, importando el resto (Zenna et al., 2017). La distribución del área cultivada del arroz africano se encuentra principalmente en África Occidental (Semon et al., 2005). *Oryza glaberrima* crece en una zona que se extiende desde el delta del río Senegal en el oeste, hasta el Lago Chad en el este. Hacia el sureste bordea las cuencas de los ríos Benue, Logone y Chari, y en las islas de Pemba y Zanzíbar en Tanzania (Agnoun et al., 2012). La producción del arroz africano se realiza en cuatro sistemas de cultivo: suelos bajos y altos de secano, suelo regado, y en aguas profundas. Sin embargo, las mayores áreas de cultivo se ubican en los suelos planos inundados del norte de Nigeria, al interior del delta del río Níger en Mali, en partes de Sierra Leona y en las colinas del área limítrofe de Gana y Togo. Su cosecha es reducida y no se comercializa en el mercado internacional (Agnoun et al., 2012).

Según la topografía el manejo del cultivo está dividido en tierras bajas de secano (33 %), aguas profundas, secano en tierras altas (30 %), regado (26 %) y manglar (4 %) (Sié et al., 2012). También existe un pequeño porcentaje del cultivo (7 %) que se realiza en tierras altas (> 1.200 m s.n.m.) (Saito et al., 2013). En el caso de Madagascar, el cultivo se realiza mediante el trasplante, en un clima tropical en la costa, templado al interior y árido en el sur. El trasplante se realiza dependiendo de la ubicación geográfica. En el este se trasplanta en octubre-noviembre y se cosecha entre abril y julio. En la costa este se trasplanta entre abril y junio y se cosecha entre octubre y noviembre. En la costa oeste se trasplanta en noviembre, febrero o julio, dependiendo de la variedad, y se cosecha en enero, mayo u octubre, respectivamente. Ciudades como Antananarivo y Amparihy, tienen una descripción climática basada en Köppen y Geiger de inviernos secos con veranos suaves (Cwb; Figura 5S) y tropical (Af; Figura 5), respectivamente. El cultivo del arroz se desarrolla gracias a las precipitaciones, que pueden superar 300 mm en un mes, lo cual está asociado a altas temperaturas medias de 20 a 25 °C promedio.

Europa

En Europa la producción de arroz se concentra en Italia (212.500 ha), España (113.200 ha), Portugal (31.200 ha), Grecia (29.200 ha), Francia (20.300 ha), Rumania (11.579 ha), Bulgaria (10.000 ha) y Hungría (2.500 ha), con una producción aproximada a los 2,7 millones de toneladas anuales, lo que corresponde a 0,4 % de la producción global de este cultivo (Hansjoerg y Vidotto, 2017). La producción corresponde a un cultivo de secano y riego.

Italia

Italia es el principal productor de arroz de Europa y el cultivo se desarrolla en el valle del río Po. Este valle abarca las provincias de Vercelli, Novara, Alessandria, Milano y Pavia en el sector oeste y en las provincias de Mantova y Verona por el sector central, y en la provincia de Ferrara en el este. También se puede observar cultivo de arroz en la zona central de Italia en la provincia de Siena y en Sardegna. El clima del valle del Po es, según Köppen y Geiger, templado con veranos cálidos (Cfa). Esta localidad tiene un promedio de temperatura anual de 12 a 14 °C, con temperaturas mínimas en enero cercanas a 2 °C y temperaturas promedio mayores a 20 °C entre junio y agosto. El promedio de precipitaciones está entre 600 y 1.400 mm por año (Figura 5U). El arroz es cultivado entre abril y octubre en condiciones de riego, en predios altamente mecanizados. La cosecha se realiza entre septiembre y octubre (Hill y Hardy, 1999).

Australia

El arroz en Australia está ubicado, principalmente, en los estados de Nueva Gales del Sur y, en menor medida, en el sur del Estado de Victoria. Los sistemas de siembra de arroz utilizados en Australia son siembra directa con maquinaria y siembra de arroz pre-germinado utilizando avión. La fecha de siembra recomendada es octubre. La zona arrocera corresponde a un clima semiárido frío (Köppen-Geiger: BSk), donde el mes más seco es febrero con 27 mm de precipitaciones (Figura 5V). En mayo la precipitación alcanza su máximo, con un promedio de 42 mm. El mes más cálido es febrero con un promedio de 24,7 °C y julio el mes más frío con 8,6 °C. La precipitación varía 15 mm entre el mes más seco y el más húmedo, y la variación en la temperatura anual alcanza los 16,1 °C.

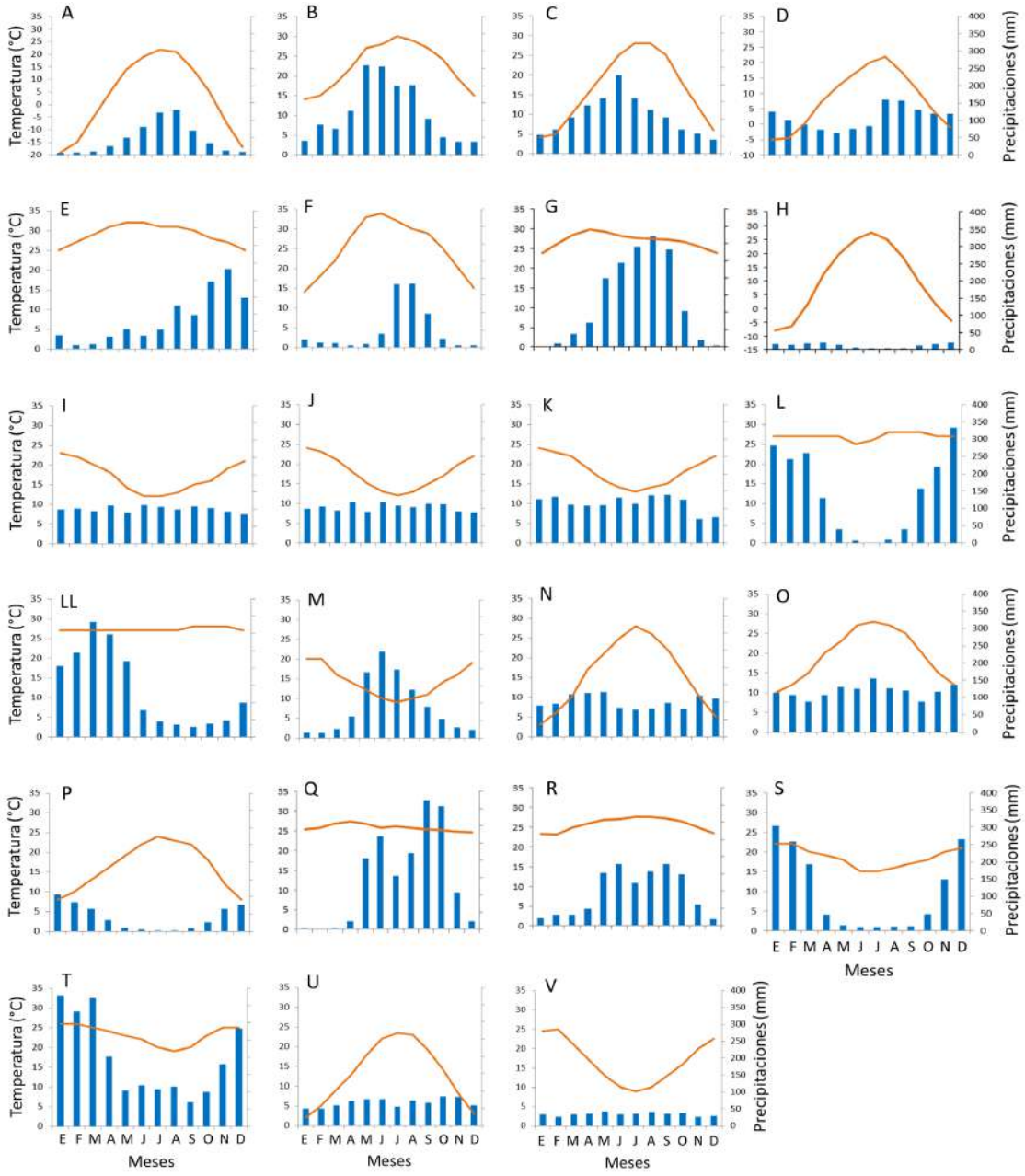


Figura 5. Climograma de las diferentes zonas climáticas donde se desarrolla el cultivo del arroz en el mundo. **Asia**: A. Ciudad de Jiamusi en la provincia de Heilongjiang, China. B. Ciudad de Guigang en la provincia de Guangxi, China. C. Isla de Hainan, China. D. Ciudad de Sapporo, Isla de Hokkaido, Japón. E. Ciudad de Kumbakonam, Tamil Nadu, India sureste. F. Ciudad de Gohana, Haryana, India norte. G. Ciudad de Ubon Ratchathani, Tailandia. H. Ciudad de Kyzylorda, Kazajistán. **América**: I. Ciudad de Bella Unión al norte de Uruguay. J. Ciudad de Treinta y Tres en Uruguay. K. Ciudad de Pelotas en Rio Grande del Sur, Brasil. L. Ciudad de Formoso Do Araguaia del estado de Tocantis, Brasil. LL. Ciudad Vitoria do Mearim en Maranhao, Brasil. M. Ciudad de Parral en Chile. N. Ciudad de Jonesboro, Arkansas, U.S.A. O. Ciudad de Lake Charles, Louisiana, U.S.A. P. Ciudad de Davis, California, U.S.A., Q. Región de Chorotega, ciudad de Liberia, Costa Rica. R. Ciudad de las Tunas, Cuba. **África**: S. Ciudad de Antananarivo, Madagascar central. T. Ciudad de Amparihy Madagascar norte. **Europa**: U. Mantua norte de Italia (valle del Po), Italia. **Oceanía**: V. Ciudad de Griffith, Nueva Gales del Sur, Australia. La línea naranja corresponde a la temperatura media y las barras de color azul corresponden a las precipitaciones mensuales (Adaptado: Zepner et al., 2020).

Determinación del potencial y brecha de rendimiento para el cultivo del arroz en el mundo

Con el fin de contar con mayor conocimiento respecto a los diferentes aspectos relacionados con el rendimiento en el cultivo del arroz, se generó la herramienta denominada atlas GYGA (www.yieldgap.org). Esta herramienta contiene información relacionada con la zonificación del cultivo del arroz en el mundo, asociando el clima, suelo y sistemas de producción, lo que permite contar con información valiosa para la toma de decisiones y realización de transferencia de tecnología. Además, esta plataforma permite la monitorización del impacto a largo plazo, evaluando además el impacto del cambio climático.

Las estimaciones de las brechas de los rendimientos están basadas en la ubicación espacial de la producción de arroz, zonas climáticas, grados día, estacionalidad en la temperatura e índice de aridez, además de datos de promedios nacionales obtenidos en cada país estudiado. La estimación del rendimiento potencial se realiza mediante la simulación basada en datos meteorológicos de al menos 10 años, información de suelo y sistema de cultivo (Van Ittersum et al., 2013; Van Wart et al., 2013a; 2013b; Van Bussel et al., 2015). La calibración utiliza modelos previamente evaluados experimentalmente en las condiciones simuladas. Estos modelos pueden ser diferentes dependiendo del sitio de estudio. Para ello, se cuenta con experimentos previos donde se realiza un cultivo sin limitantes de nutrientes, enfermedades, malezas o clima. La calibración fenológica se basa en datos meteorológicos, fechas de siembra y madurez entregada por agrónomos de los países estudiados. Hasta ahora no todos los países arroceros han sido estudiados. Sin embargo, aquí se muestran los principales resultados.

Estudios realizados en China, basados en GYGA, muestran un potencial de rendimiento promedio de 9,5 t ha^{-1} en arroz de riego. Considerando que el rendimiento actual es de 6,9 t ha^{-1}, la brecha explotable de rendimiento en este país es sólo de 0,7 t ha^{-1}, ya que en condiciones comerciales sería posible alcanzar el 80% del rendimiento potencial estimado. Los rendimientos promedio agrícolas a menudo comienzan a estancarse cuando alcanzan entre el 75 % y el 85 % del potencial de rendimiento (Cassman et al., 2003; Lobell et al., 2009). Por otro lado, India tiene un promedio de rendimiento de 4,4 t ha^{-1}, con un potencial de rendimiento de 9,0 t ha^{-1}. En el caso del arroz de secano, estudios realizados en la India demuestran que existe un valor actual de 1,7 t ha^{-1} de rendimiento en grano, lo que contrasta con el potencial de 6,9 t ha^{-1}, dependiendo de la presencia de precipitaciones. En el caso del arroz de secano en Brasil, se muestra que, considerando un rendimiento actual promedio de 2,6 t ha^{-1}, se puede esperar un rendimiento potencial de 9,7 t ha^{-1} (www.yieldgap.org). En el caso de U.S.A., los rendimientos actuales para el arroz de riego son cercanos a 8,1 t ha^{-1} y el rendimiento potencial promedio es de 12,4 t ha^{-1}. En el caso del arroz de riego en Brasil, los rendimientos actuales alcanzan 7,6 t ha^{-1} con un potencial de rendimiento de 14,8 t ha^{-1}, mientras que en Uruguay el rendimiento promedio actual es de 8,1 t ha^{-1} y el potencial es similar al de Brasil (14 t ha^{-1}) (Carracelas et al., 2019). En estos países (Brasil, Uruguay y U.S.A.) se registró el mayor potencial de rendimiento y rendimientos actuales de una sola cosecha de arroz por año. La variación en el potencial del rendimiento detectada en los países productores de arroz incluidos en el Atlas Mundial de Brecha de Rendimiento, se explica principalmente por la amplia gama de ambientes donde se cultiva arroz y las diferencias en los sistemas de producción del cultivo. Los rendimientos actuales promedio, para la mayoría de los países incluidos en el atlas mundial, indican que sería posible mantener, o incluso aumentar, la producción de granos dentro de las áreas de producción de arroz existentes. Este aspecto es de fundamental importancia ya que contribuiría a satisfacer la creciente demanda de alimentos a nivel mundial (Carracelas et al., 2019).

Consideraciones finales

Las bajas temperaturas, la radiación solar y las precipitaciones, son uno de los principales factores que limitan la distribución del cultivo del arroz en el mundo. Según lo estudiado, este cultivo

está presente en climas tropicales, secos y templados. Con ello, se muestra que el cultivo del arroz tiene una amplia distribución mundial. No obstante, aún existen importantes brechas de rendimiento en grano en diferentes países, lo que hace necesario mantener y sumar más países a los estudios de brecha y zonificación del cultivo, que incorporen información edafoclimática.

Referencias

Aghaee, A., Moradi, F., Zare-Maivan, H., et al. 2011. Physiological responses of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to chilling stress at seedling stage. Afr. J. Biotechnol. 10:7617-7621.

Agnoun, Y., Biaou, S., Sié, M., et al. 2012. The African rice *Oryza glaberrima* Steud.: Knowledge distribution and prospects: Int. J. Biol. 4:158-180.

Aguirre-Gutiérrez, J., Serna-Chavez, H.M., Villalobos-Arambula, A.R., et al. 2015. Similar but not equivalent: ecological niche comparison across closely-related Mexican white pines. Divers. Distrib. 21:245-257.

Allen, D.J., Ort, D.R. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. Trends Plant Sci. 6:36-42.

Andaya, V.C., Mackill, D.J. 2003. Mapping of QTLs associated with cold tolerance during the vegetative stage in rice. J. Exp. Bot. 54:2579-2585.

Bandumula, N. 2018. Rice production in Asia: Key to global food security. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 88:1323-1328.

Campillo, C., Fortes, R., del Henar Prieto, M. 2012. Solar radiation effect on crop production solar radiation. p. 1-30. In Babatunde, E.B. (ed.) Solar radiation. Covenant University, Ota, Nigeria.

Carracelas, G., Guilpart, N., Grassini, P., et al. 2019. Potencial y brecha de rendimiento de arroz irrigado en Uruguay y otros países arroceros. p. 53-56. In Terra, J., Martínez, S., Saravia H. (eds.) Arroz 2019. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA, Uruguay.

Cassman, K.G., Dobermann, A.R., Walters, D.T., et al. 2003. Meeting Cereal Demand While Protecting Natural Resources and Improving Environmental Quality. Annu. Rev. Env. Resour. 28:315-358.

Castaño, J., Giménez, A., Ceroni, M., et al. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay, Serie Técnica N° 193 (34 p).

da Cruz, R., Milach, S.C., Federizzi, L.C. 2006. Inheritance of rice cold tolerance at the germination stage. Genet. Mol. Biol. 29:314-320.

de Groot, H. 2015. GYGA irrigated rice results. CGIAR research program on climate change, agriculture and food security (CCAFS), Copenhagen, Denmark.

Diagne, A., Amovin-Assagba, E., Koichi, F., et al. 2013. Estimation of cultivated area, number of farming households and yield for major rice-growing environments in Africa. p. 35-45. In Wopereis, M.C., Johnson, D.E., Ahmadi, N., et al. (eds.) Realizing Africa's rice promise. CABI, Boston, USA.

Díaz, S., Morejón, R., Castro, R., et al. 2006. Comportamiento de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) seleccionados para tolerancia a bajas temperaturas en siembra temprana de frío. Cult. Trop. 27:71-75.

Donoso, G., Leyton, M., Paredes, M., et al. 2014. Relative expression of genes related with cold tolerance in temperate rice at seedling stage. Afr. J. Biotechnol. 13:2506-2512.

Fahad, S., Adnan, M., Noor, M., et al. 2019. Major constraints for global rice production. p. 1-22. In Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Naha., K., et al. (eds.) Advances in rice research for abiotic stress tolerance. Elsevier, London, UK.

FAO. 1998. Wetland characterization and classification for sustainable agricultural development. FAO, Harare, Zimbabwe.

FAO. 2002. Rice Information. FAO, Rome, Italy.

Fujino, K., Sekiguchi, H., Sato, T., et al. 2004. Mapping of quantitative trait loci controlling low-temperature germinability in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 108:794-799.

Gautam, P., Lal, B., Nayak, A.K., et al. 2019. Inter-relationship between intercepted radiation and rice yield influenced by transplanting time, method, and variety. Int. J. Biometeorol. 63:337-349.

Haefele, S.M., Nelson, A., Hijmans, R.J. 2014. Soil quality and constraints in global rice production. Geoderma 235:250-259.

Hansjoerg, K., Vidotto, F. 2017. Rice production in Europe. In Chauhan, B.S., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice production worldwide. Springer, Cham, Switzerland.

Hill, J.E., Hardy, B. 1999. Proceedings of the Second Temperate Rice Conference. IRRI Books Nr 281816. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.

Howarth, C.J., Ougham, H.J. 1993. Gene expression under temperature stress. New Phytol. 125:1-26.

Laborte, A., Gutiérrez, M., Balanza, J., et al. 2017. RiceAtlas, a spatial database of global rice calendars and production. Sci. Data 4:170074.

Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. Annu. Rev. Env. Resour. 34:179-204.

Mahajan, G., Kumar, V., Chauhan, B.S. 2017. Rice production in India. In Chauhan, B., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice production worldwide. Springer, Cham, Switzerland.

McCree, K.J. 1972a. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agric. Meteorol. 9:191-216.

McCree, K.J. 1972b. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. Agric. Meteorol. 10:443-453.

Mottus, M., Sulev, M., Baret, F., et al. 2013. Photosynthetically active radiation: Measurement and modeling. In Richter, C., Lincot, D., Gueymard, C.A. (eds.) Solar energy. Springer, New York, USA.

Patra, B., Ray, S., Ngangkham, U., et al. 2016. Rice. p. 1-80. In Singh, M., Upadhyaya H. (eds.) Genetic and Genomic Resources for Grain Cereals Improvement. Academic Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.

Ricepedia. 2020. Rice around the world. http://ricepedia.org/rice-around-the-world (acceso 16-03-2020).

Ryu, Y., Jiang, C., Kobayashi, H. 2000. MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000. Remote Sens. Environ. 204:812-825.

Saito, K., Nelson, A., Zwart, S.J., et al. 2013. Towards a better understanding of biophysical determinants of yield gaps and the potential for expansion of the rice area in Africa. p. 188-203. In Wopereis, M.C., Johnson, D.E., Ahmadi, N., et al. (eds.) Realizing Africa's rice promise. CAB International, Wallingford, UK.

Semon, M., Nielsen, R., Jones, M., et al. 2005. The population structure of African cultivated rice *Oryza glaberrima* (Steud.): Evidence for elevated levels of linkage disequilibrium caused by admixture with *O. sativa* and ecological adaptation. Genetics 169:1639-1647.

Shimono, H., Okada, M., Kanda, E., et al. 2007. Low temperature-induced sterility in rice: Evidence for the effects of temperature before panicle initiation. Field Crops Res. 101:221-231.

Sié, M., Sanni, K., Futakuchi, K., et al. 2012. Towards a rational use of African rice (*Oryza glaberrima* Steud.) for breeding in sub-Saharan Africa. G3-Genes Genom. Genet. 6(Special issue 1):1-7.

Suzuki, K., Nagasuga, K., Okada, M. 2008. The chilling injury induced by high root temperature in the leaves of rice seedlings. Plant Cell Physiol. 49:433-442.

Takahashi, N. 1984. Differentiation of ecotypes in *Oryza sativa* L. p. 31-67. In Takahashi, N., Tsunoda S. (eds.) Biology of rice. Japan Science Society, Tokyo, Japan.

Tang, S., Ding, L., Bonjean, A. 2010. Rice production and genetic improvement in China. p. 15-34. In He, Z., Bonjean, A. (eds.) Cereals in China. CIMMYT, México.

Van Bussel, L.G.J., Grassini, P., Van Wart, J., et al. 2015. From field to atlas: upscaling of location-specific yield gap estimates. Field Crops Res. 177:98-108.

Van Ittersum, M., Cassman K.G., Grassini, P. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. Field Crops Res. 143:4-17.

Van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., et al. 2013a. Estimating crop yield potential at regional to national scales. Field Crop Res. 143:34-43.

Van Wart, J., Van Bussel, L.G.J., Wolf, J., et al. 2013b. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. Field Crop Res. 143:44-55.

Washio, K. 2013. The prediction of climate change and rice production in Japan. Rice Res. 2:1-3.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals in rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.

Zenna, N., Senthilkumar, K., Sie, M. 2017. Rice production in Africa. p. 117-135. In Chauhan, B., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice production worldwide. Springer, Cham, Switzerland.

Zepner, L., Karrasch, P., Wiemann, F., et al. 2020. ClimateCharts.net – an interactive climate analysis web platform. Int. J. Digit. Earth doi:10.1080/17538947.2020.1829112.

Capítulo 5. Influencia del clima en el desarrollo de la planta de arroz en Chile: el cultivo de arroz más austral del mundo

Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G., Claudia Marchesi G.

Chile es el país más austral del mundo donde se cultiva el arroz (*Oryza sativa* L.). Las principales comunas arroceras son Villa Alegre (35°41´7,04" S; 71°40´58,55" O), San Javier, Linares, Longaví, Retiro (36°15´44,42" S; 71°38´42,14" O), Parral en la región del Maule, y Ñiquén (36°18´8,5" S; 71°38´42,14" O), San Carlos y San Nicolás (36°28´47,21" S; 72°13´41,63" O) en la región de Ñuble (Figura 1).

La planta de arroz es un cultivo de origen tropical y semitropical, por ello, normalmente requiere temperaturas de entre 20 y 35°C durante gran parte de su desarrollo (Yoshida, 1981). Sin embargo, el sector arrocero de Chile está ubicado en una zona de clima mediterráneo a mediterráneo temperado (Novoa et al., 1989) o templado (Kottek et al., 2006), lo que implica que la planta debe soportar condiciones subóptimas de temperatura durante todo su crecimiento y desarrollo (Yoshida, 1981). De esta manera, las bajas temperaturas afectan los estados de germinación, plántula y reproductivo, causando pérdidas en los rendimientos en grano, lo cual se ve acentuado cuando se realizan siembras posteriores al mes de octubre (Donoso y Paredes, 2015).

Las precipitaciones son una importante restricción para este cultivo. En los últimos nueve años, la disponibilidad de agua para riego ha disminuido entre un 20 y un 40 %, debido a un evento climático denominado ´mega sequía` (Garreaud et al., 2019). Éste explica la merma considerable en la acumulación de nieve en la Cordillera de los Andes, y agua en los embalses, desde donde proviene más del 90 % del agua utilizada por los cultivos de arroz. Esta situación es similar a lo reportado en otros lugares del mundo (Tuong y Bouman, 2003, Bouman et al., 2007, CSIRO, 2008; Gaydon et al., 2010; Mekonnen y Hoekstra, 2016), obligando a los agricultores a reducir su superficie sembrada, con el fin de evitar la falta del recurso hídrico a final de temporada.

Por otro lado, la abundante radiación solar disponible en la zona arrocera, cuyo máximo se registra durante la etapa reproductiva del cultivo, permite contar con altos potenciales de rendimiento. Otro factor importante a tener en cuenta es el fotoperíodo, donde las máximas horas de sol se logran en diciembre.

Debido a esta situación, es fundamental tener un conocimiento preciso de las condiciones climáticas del sector arrocero. Por ello, en el periodo 2012-2014 se realizó un esfuerzo público-privado (INIA y empresas Tucapel S.A. y Carozzi, S.A.) para instalar tres estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) que fueron incorporadas a la Red de Estaciones Meteorológicas del Ministerio de Agricultura y que controla el INIA, con acceso gratuito para consultar datos climáticos. Estas EMAs están ubicadas en San Carlos (CE Arroz), al sur de Parral (Monte Flor-Tucapel), y en Longaví (Miraflores) (Foto 1) (https://agrometeorologia.cl)

Foto 1. Estaciones meteorológicas automáticas instaladas en al área arrocera: Miraflores en Longaví (35°49'3,64" S; 71°46'30,27" O), Monte Flor-Tucapel en Parral (36°14'41,68" S; 71°56'3,06" O) y en el Campo Experimental de Arroz de INIA, en San Carlos (36°24'30,15" S; 72°0'24,47"O). INIA-Tucapel S.A.-Carozzi S.A.

Parte importante de los análisis y conclusiones de este capítulo se basan en la información generada por estas estaciones meteorológicas. Posterior a la puesta en marcha de estas tres EMAs, se sumó una cuarta unidad proporcionada por la Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, ubicada en la comuna de Parral y que es manejada por el Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA) de la Universidad de Talca.

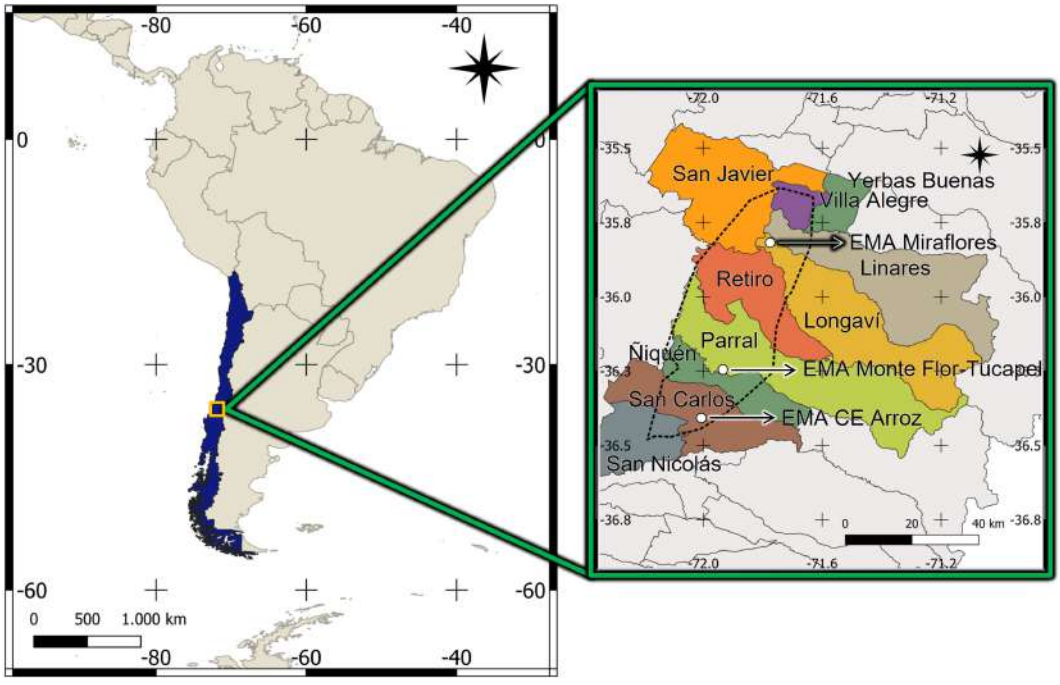


Figura 1. Mapa del sector arrocero. Enmarcado en verde se muestra una ampliación de la zona arrocera de Chile. El polígono con perímetro color negro discontinuo, encierra las comunas en donde se cultiva el arroz en Chile y se destaca la ubicación de las tres EMAs INIA.

Condiciones agroclimáticas del sector arrocero de Chile

El sector arrocero tiene un clima templado con veranos suaves, que según la clasificación climática de Köppen-Geiger, corresponde al grupo Csb (Kottek et al., 2006) (Figura 2).

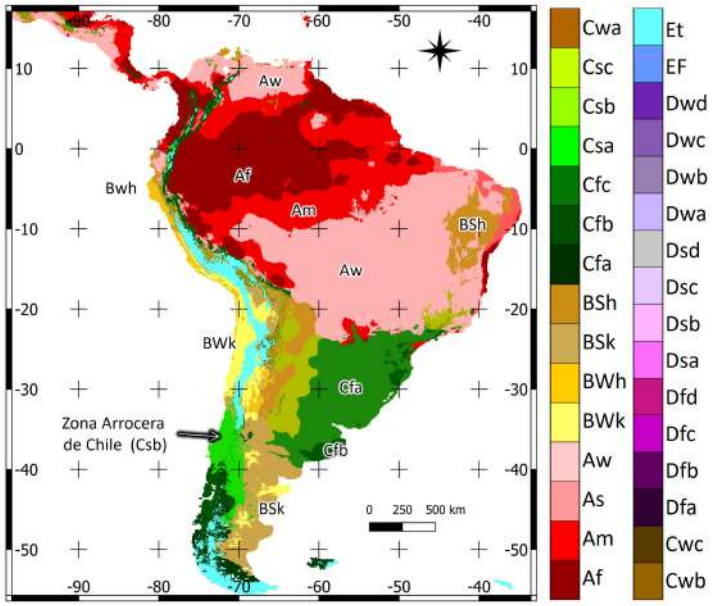


Figura 2. Clasificación climática de la zona arrocera de Chile. Clasificación de climas según Köppen-Geiger: **Clima A**: Tropical (Af: Ecuatorial; Am: Monzónico; As: Sabana (verano seco); Aw: Sabana (invierno seco), **Clima B**: Seco (Árido y Semiárido)(BS: Estepario; BSh: Estepario cálido; BSk: Estepario frío; BW: Desértico; BWh: Desértico cálido; BWk: Desértico frío), **Clima C**: Templado/Mesotermal (Cf: Precipitaciones constantes(Cfa: Verano cálido; Cfb: Verano suave; Cfc: Verano frío); Cs: Verano seco (Csa: Verano cálido; Csb: Verano suave; Csc: Verano frío); Cw: Invierno seco (Cwa: Verano cálido; Cwb: Verano suave; Cwc: Verano frío)), **Clima D**: Templado frío/Continental/Microtermal (Df: Precipitaciones constantes (Dfa: Verano cálido; Dfb: Verano suave; Dfc: Verano frío; Dfd: Invierno muy frío); Ds: Verano seco (Dsa: Verano cálido; Dsb: Verano suave; Dsc: Verano frío; Dsd: Verano muy frío; Dw: Invierno seco; Dwa: Verano cálido; Dwb: Verano suave; Dwc: Verano frío; Dwd: Verano muy frío)), **Clima E**: Polar y de alta montaña (ET: Tundra; EF: Hielo; EB: Alta montaña) (Adaptado: Kottek et al., 2006).

Las condiciones climáticas asociadas, principalmente, a las bajas temperaturas presentes en la zona arrocera de Chile, afectan el crecimiento y el desarrollo de la planta de arroz (Donoso et al., 2015). Las bajas temperaturas se manifiestan durante la noche, siendo esta intermitencia de temperatura día-noche lo que también afectaría la planta de arroz. Estas condiciones climáticas están representadas gráficamente con los promedios de temperaturas mínimas, medias y máximas, precipitaciones mensuales, radiación solar mensual acumulada y largo del día, registradas en cuatro localidades representativas de la zona arrocera del país. Estas condiciones climáticas también definen las actividades agronómicas que se ejecutan en el cultivo. Es así como, durante septiembre, se realizan gran parte de las labores previas a la siembra, por lo que las condiciones climáticas, en especial las precipitaciones, afectan directamente esta actividad. Durante este período, las precipitaciones en promedio superan los 50 mm en todas las localidades (Figura 3).

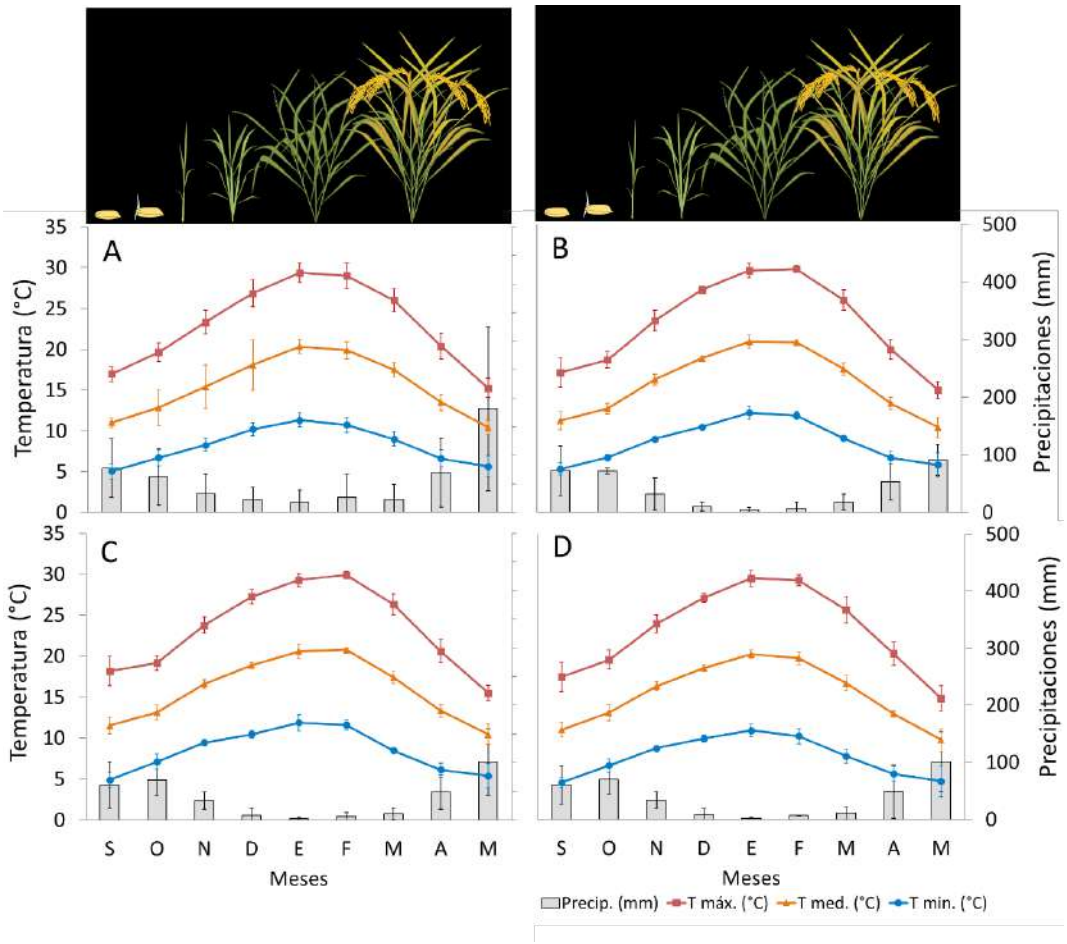


Figura 3. Climograma de la zona arrocera de Chile entre siembra y cosecha del arroz. A) Climograma de Chillán (Estación meteorológica General Bernardo O'Higgins de la Dirección Meteorológica de Chile), B) Climograma de San Carlos (Estación meteorológica CE Arroz de INIA Chile), C) Climograma de Parral (Estación meteorológica Monte Flor-Tucapel de INIA Chile), D) Climograma de Linares (Estación meteorológica Miraflores y Santa Amada de INIA Chile). La información corresponde a datos correspondientes a 40 años en Chillán, cuatro años en San Carlos, en Parral y en Linares. En color rojo se muestran las temperaturas máximas, en color naranjo se muestran las temperaturas medias y en azul las temperaturas mínimas. Las barras de color gris muestran las precipitaciones acumuladas mensuales. En todos los casos las barras de arroz corresponden a la desviación estándar. En la parte superior se muestra de manera referencial el desarrollo fenológico de la planta de arroz, desde siembra a cosecha.

Otros factores climáticos, como la radiación solar acumulada o el fotoperíodo, no son limitantes durante este periodo, ya que la radiación acumulada varía entre los 390 a 420 MJ m^{-2}, y se presenta un largo del día de 11 h (Figura 4).

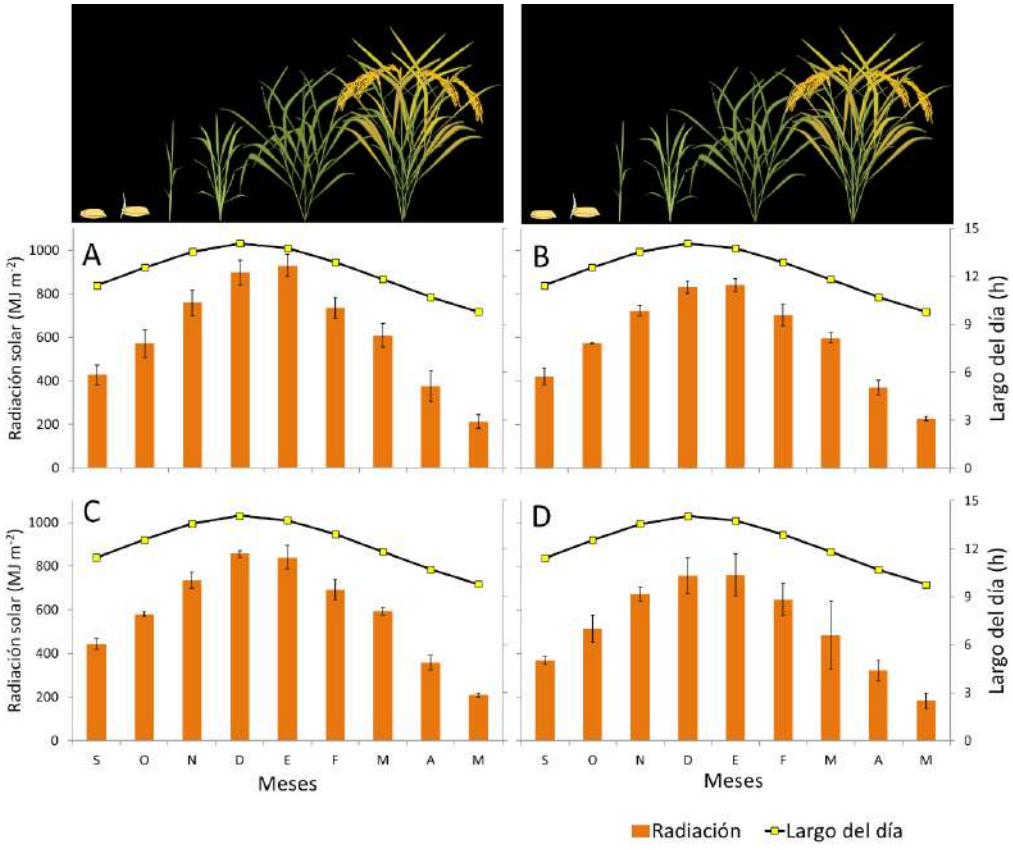


Figura 4. Radiación solar mensual acumulada y largo del día en el sector arrocero de Chile. A) Chillán (Estación meteorológica del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción), B) San Carlos (Estación meteorológica CE Arroz de INIA Chile), C) Parral (Estación meteorológica Monte Flor-Tucapel de INIA Chile), D) Linares (Estación meteorológica Miraflores y Santa Amada de INIA Chile). La información corresponde a datos correspondientes a 18 años en Chillán, cuatro años en San Carlos y Parral y cinco años en Linares.

Otra actividad importante a considerar en esta época del año es la fecha de siembra, donde las temperaturas pueden afectar el proceso de germinación y emergencia de las plántulas, especialmente en casos de siembras tempranas realizadas a fines de septiembre (Castillo y Alvarado, 2002; Donoso et al., 2013), debido a que en esa época del año se suelen presentar temperaturas mínimas que pueden variar entre 4,5 y 6,4 °C y máximas entre 17,0 y 18,2 °C. Dada esta situación, el periodo óptimo para la siembra del arroz se encuentra entre el 1 y el 20 de octubre (Donoso y Paredes, 2015). Durante este mes las temperaturas se incrementan, llegando las mínimas del aire a 6,6 °C y las máximas a 19,6 °C. Sin embargo, a pesar de la presencia de estas temperaturas sub-óptimas para la emergencia de las plántulas, la planta de arroz se establece en esta zona producto de los altos niveles de tolerancia al frío que tienen las variedades chilenas en esta etapa de su desarrollo (Donoso et al, 2015). Durante el período de siembra, otro factor a considerar son las precipitaciones, que pueden atrasar la fecha de siembra en el caso del sistema de siembra directa, lo que finalmente retrasa la fenología. Con ello se expone a la planta a bajas temperaturas durante el período reproductivo, lo que afectará finalmente el rendimiento en grano de la planta. Por el contrario, en el caso de la siembra con arroz pregerminado, las precipitaciones no tienen un efecto negativo, pues esta actividad se puede realizar a pesar de las precipitaciones. La radiación solar y el fotoperíodo no son factores limitantes para las actividades agronómicas, ya que alcanzan niveles de 570 a 590 MJ m^{-2} y un largo de día de 13 h.

En noviembre la planta de arroz se encuentra entre el estado de plántula e inicios de macolla. Durante esta etapa del desarrollo, las bajas temperaturas afectan la fenología del cultivo, alargando el periodo vegetativo. En condiciones habituales, las temperaturas mínimas durante este mes pueden variar entre 8,3 y 9,4 °C, y las máximas pueden alcanzar un promedio de hasta 24,8 °C. Las temperaturas diurnas permiten que las plantas comiencen el crecimiento y desarrollo de hojas y tallos. A contar de noviembre las precipitaciones disminuyen a menos de la mitad, por lo que el aporte de la lluvia es poco significativo para el desarrollo posterior de la planta. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, ésta es cercana a los 720 a 770 MJ m^{-2} y el largo del día alcanza las 14 h.

En diciembre, en tanto, la planta de arroz se encuentra en plena macolla y a fines de mes, dependiendo de la fecha de siembra, la planta debiera iniciar la formación del primordio floral, iniciándose la etapa reproductiva del cultivo. En esta etapa las bajas temperaturas pueden ser muy perjudiciales para el desarrollo del óvulo y la formación del polen (Liu et al., 2019). En promedio, las temperaturas mínimas son cercanas a 10 °C y las máximas a 27 °C. Por esta razón, en el periodo inicial de la etapa reproductiva se recomienda mantener la planta bajo inundación, con el fin de utilizar el agua como amortiguador de la temperatura del aire y reduciendo las grandes fluctuaciones de la temperatura del aire. En este punto es importante considerar que las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas pueden ser de 20 °C o más.

Debido a esta situación es importante tener un control del manejo del agua, pues si el agricultor ingresa constantemente agua fría a los cuadros en periodos de bajas temperaturas del aire, se podría afectar el desarrollo del primordio floral (Ortega, 2007; Ortega et al., 2011). Durante este período, las precipitaciones pueden variar entre 8 mm y 22 mm, lo cual no constituye un aporte significativo al riego del cultivo.

Respecto a la radiación solar acumulada, en este periodo es cercana a los 830 y 897 MJ m^{-2} y el largo del día alcanza las 14,5 h. En diciembre se logra el valor máximo de radiación solar y largo del día. A partir de este momento, el largo del día comienza a decrecer hasta llegar a las 12,3 h en marzo. En el caso de la radiación, el valor se mantiene alto hasta enero, alcanzado un valor cercano a los 840 y 870 MJ m^{-2}, iniciándose un decrecimiento hasta llegar a valores entre 590 y 610 MJ m^{-2} en marzo.

Durante enero se expresa la etapa reproductiva, incluyendo la etapa de desarrollo más sensible que es la microsporogénesis (Nishiyama, 1995). Idealmente, la floración debiera ocurrir a mediados de enero, con lo que se evita, en gran medida, la exposición a bajas temperaturas durante la fecundación y el llenado de grano. En promedio, las temperaturas mínimas durante la noche son cercanas a 11 °C, en tanto que las máximas durante el día pueden llegar hasta 30 °C. Si bien las temperaturas mínimas son sub-óptimas para el cultivo del arroz, éste se desarrolla sin dificultades gracias a las temperaturas que se alcanzan en el día.

En el caso que ocurran eventos de bajas temperaturas durante esta etapa del desarrollo, se puede generar esterilidad floral, lo que implica disminuciones importantes en el rendimiento, pudiendo superar el 50 %. Temperaturas medias menores a 20 °C afectan el desarrollo y la viabilidad del grano de polen, generando esterilidad floral (Alvarado, 1999; Ortega, 2007; Ortega et al., 2011; Fuentealba-Sandoval et al., 2014). En todo caso esta situación no es tan común, lo que se refleja en las temperaturas medias de enero que son cercanas a los 20 °C. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, ésta es cercana a los 840 y 870 MJ m^{-2} con un largo de día de 14,3 h.

La floración ocurre entre fines de enero y la primera semana de febrero, completándose de esta manera la etapa reproductiva de la planta de arroz, y dando inicio a la siguiente fase, el llenado del grano. Durante la etapa reproductiva, tanto las altas como las bajas temperaturas pueden tener un efecto negativo en la fecundación. Temperaturas inferiores a 10 °C y superiores a 39 °C afectan la germinación del polen y el alargamiento del tubo polínico, afectando el proceso de

fecundación (Coast et al., 2015). Por otro lado, temperaturas de 16 °C afectan negativamente la formación del polen (hipertrofia del tapete, lóculos atrofiados, granos malformados, retraso en la antesis), disminuyendo su viabilidad y, por consecuencia, generando una baja en los rendimientos en grano. En estos parámetros se observó una diferencia entre las variedades chilenas, siendo ´Zafiro-INIA` más tolerante al frío que ´Diamante-INIA` (Fuentealba-Sandoval et al., 2014).

En general, en febrero se presentan temperaturas similares a enero, con promedios de mínimas cercanas a 11 °C y máximas entre 29 °C y 30 °C. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, ésta es cercana a los 690 y 730 MJ m^{-2}, con un largo de día de 13,3 h.

En marzo la planta de arroz termina el proceso de maduración para dar inicio a la cosecha. Durante este proceso las precipitaciones pueden afectar negativamente la cosecha, impidiendo la entrada de las máquinas cosechadoras que no poseen rueda oruga e incrementando el porcentaje de humedad del grano y, por ende, disminuyendo su calidad industrial. En general, las precipitaciones registradas durante este período varían entre 11 y 17 mm, pudiendo incrementarse hasta tres veces durante abril. Por ello, es recomendable cosechar lo más temprano posible. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, es cercana a los 590 y 610 MJ m^{-2}, con un largo de día de 12,3 h.

Para aprovechar al máximo las condiciones climáticas mencionadas en esta descripción y el potencial de rendimiento de las variedades de arroz utilizadas en Chile, es importante realizar todas las prácticas de manejo en los tiempos recomendados para este cultivo.

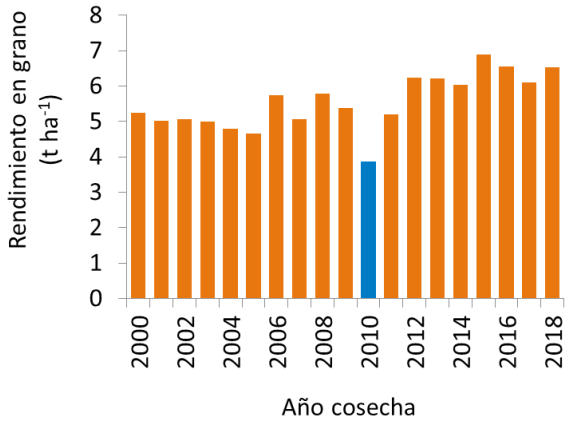
Efectos del frío en el cultivo del arroz

En Chile, las bajas temperaturas nocturnas son una de las principales limitaciones climáticas para el desarrollo del cultivo del arroz. Sin embargo, las variedades comerciales desarrolladas por INIA tienen altos niveles de tolerancia a las bajas temperaturas, lo que les permite desarrollar sus etapas fenológicas en forma normal, salvo casos excepcionales (Donoso et al., 2014; Donoso y Paredes, 2015). En general, las bajas temperaturas pueden generar retrasos en la germinación y emergencia de las plántulas, pérdida de población de plantas, retrasos en el desarrollo de las etapas fenológicas de la planta, y esterilidad floral (Baruah et al., 2009; Grohs et al., 2016; Shakiba et al., 2017).

La etapa más sensible al frío es la etapa reproductiva, en donde temperaturas medias menores a 20 °C perjudican el desarrollo y la viabilidad del grano de polen, generando esterilidad floral y reducciones importantes en el rendimiento del cultivo que pueden llegar a más de un 60 % en el rendimiento en grano (Alvarado, 1999). Una vez ocurrido el daño por frío, éste se puede expresar visiblemente desde el segundo hasta el quinto día posterior al estrés (Satake y Hayase, 1970). Ocurre principalmente en las anteras y en el estado de microsporogénesis (Nishiyama, 1995), generando polen defectuoso y estéril (Williams y Angus, 1994; Fuentealba-Sandoval et al., 2014).

Resultados de las temporadas 1989-1990 y 1997-1998 (Alvarado, 1999) muestran que las bajas temperaturas (medias menores a 17 °C) produjeron un incremento del periodo de siembra a floración de 91 a 129 d en la variedad 'Diamante-INIA' y de 89 a 126 d en la variedad 'Oro', con una esterilidad floral de hasta 65 % en la variedad 'Diamante-INIA' y 39 % en la variedad 'Oro'. Para disminuir los daños producidos por las bajas temperaturas, resulta recomendable la siembra temprana y la mantención de la lámina de agua, debido a su efecto amortiguador de la temperatura del aire a partir de la etapa reproductiva.

Para ilustrar de mejor manera los efectos de las bajas temperaturas en condiciones de campo, se muestran los resultados obtenidos en la temporada 2009-2010, considerada como una de las temporadas más frías de las últimas décadas. En ese periodo se observaron reducciones de los rendimientos en grano a nivel nacional de un 30 %, comparado con el promedio de rendimientos de nueve temporadas anteriores y ocho temporadas posteriores (Figura 5).



Fuente: INE, 2020.

Figura 5. Rendimientos nacionales de arroz en grano paddy durante los últimos 18 años. En color azul, se destaca el rendimiento promedio nacional obtenido durante la temporada de bajas temperaturas, 2009-2010.

Al comparar la temporada de bajas temperaturas promedio con una temporada considerada como normal para el cultivo del arroz, se observa una diferencia de hasta 2 °C en las temperaturas mínimas, de 4 °C en la temperatura media y casi de 7 °C en la temperatura máxima (Figura 6). Estas diferencias ocurrieron, principalmente, entre noviembre y febrero, y determinaron un atraso en la fenología de la planta. Como consecuencia de ello, se produjo una mayor exposición del estado reproductivo a bajas temperaturas, lo que indujo una importante esterilidad floral (vanazón) (Figura 7).

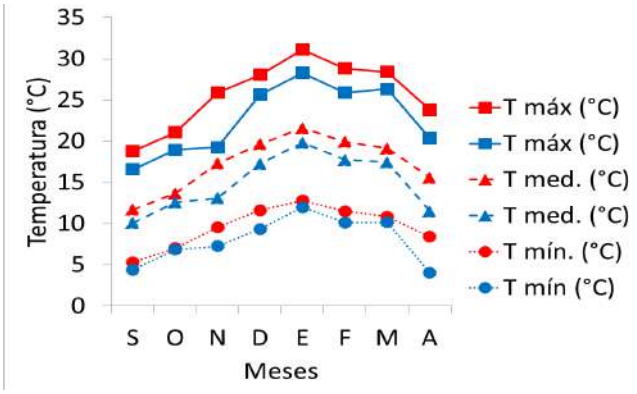


Figura 6. Temperaturas en temporadas 2008-2009 (año normal) y 2009-2010 (año frío). En color rojo se representan las temperaturas de la temporada 2008-2009. En color azul las temperaturas de 2009-2010. Estación meteorológica del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción, Chillán, Chile.

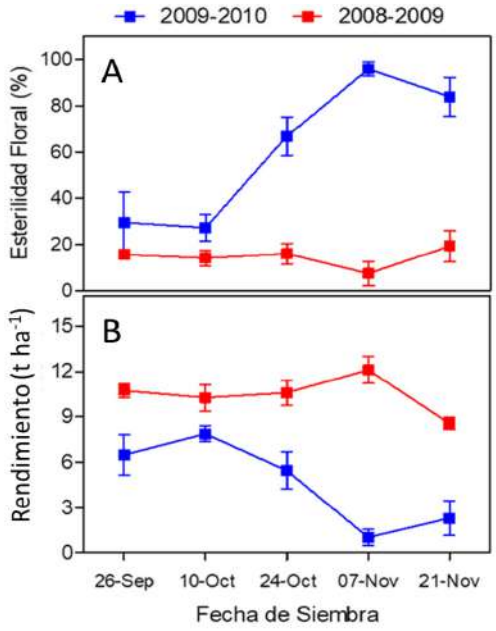


Figura 7. Efecto de la época de siembra y bajas temperaturas en la esterilidad floral y rendimiento en el arroz. A) Evaluación de la esterilidad floral, B) Evaluación del rendimiento en grano. En color rojo se representa la temporada 2008-2009 y en color azul la temporada 2009-2010. Las barras corresponden al error estándar de tres repeticiones. Línea azul, corresponde al año frío y línea roja corresponde al año normal (Adaptado: Donoso et al., 2015).

Al comparar diferentes fechas (épocas) de siembra realizadas en la temporada de bajas temperaturas y en una temporada normal, se pudo observar que el período de siembra a floración se incrementó en 19 d en promedio en la temporada fría (Donoso et al., 2015). Además, se apreció un incremento en la esterilidad floral cercano al 90 % en las fechas más tardías y una reducción en el rendimiento del grano de 7 t ha^{-1}, llegando a rendimientos cercanos a 3 t ha^{-1}. Cabe resaltar que, en siembras realizadas a partir del 24 de octubre, los rendimientos fueron un 20 % inferiores a la siembra más temprana ocurrida el 10 de octubre y un 50 % inferiores a la de un año normal.

Relaciones entre características agronómicas y parámetros climáticos

Con el objetivo de conocer la incidencia del clima en el desarrollo productivo de la planta de arroz, se realizó un estudio de las correlaciones entre las características agronómicas como el rendimiento en grano, esterilidad floral y la floración, en cuatro temporadas, y cinco fechas de siembra en la localidad de San Carlos, con índices agroclimáticos como:

> Grados día acumulados (GDA) (°C) entre la siembra y la floración (GDA siembra-floración), entre la siembra y el inicio de panícula (GDA siembra-inicio panícula), y entre el inicio de panícula y la floración (GDA inicio panícula-floración), utilizando la siguiente fórmula (McMaster y Wilhelm, 1997):

$$GDA = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{TMi + Tmi}{2} \right) - Tbase$$

Donde TMi corresponde a la temperatura máxima del día i, donde i corresponde al día 1, 2, 3,…… hasta el día n, estudiado; Tmi a la temperatura mínima del día i, donde i corresponde al día 1, 2, 3,…… hasta el día n, estudiado y Tbase a la temperatura base para el cultivo del arroz (10 °C).

Grados frío acumulados (GFA) (°C) entre la siembra y la floración (GFA siembra-floración), entre la siembra y el inicio de panícula (GFA siembra-inicio panícula), y entre el inicio de panícula y la floración (GFA inicio panícula-floración), utilizando la siguiente fórmula:

$$GFA = \sum_{i=1}^{n} Tbase - Tmi < 10\ °C$$

Donde Tbase es la temperatura base para el cultivo del arroz (10 °C) y Tmi corresponde a la temperatura mínima menor a 10 °C del día i, donde i corresponde al día 1, 2, 3,…… hasta el día n, estudiado.

Radiación acumulada (RA) (MJ m^{-2}) entre la siembra y la floración (RA siembra-floración), entre la siembra y el inicio de panícula (RA siembra-inicio panícula), y entre el inicio de panícula y la floración (RA inicio panícula-floración).

Temperatura crítica acumulada (TCA) entre el inicio de panícula y la floración (TCA inicio panícula-floración), utilizando la siguiente fórmula:

$$TCA = \sum_{i=1}^{n} Tmi > 10\ °C - Tbase$$

Donde Tbase es la temperatura base para el cultivo del arroz (10°C) y Tmi corresponde a la temperatura mínima mayor a 10 °C del día i, donde i corresponde al día 1, 2, 3,…… hasta el día n, estudiado.

El rendimiento en grano se correlacionó significativamente con la variable climática TCA inicio panícula-floración ($r = 0,87$, $p < 0,01$; $R^2 = 0,89$) (Cuadro 2; Figura 8A). Con ello se entiende que el rendimiento en grano depende de las temperaturas mínimas que ocurren entre el inicio de la formación de la panícula hasta la floración. Es importante mencionar que la variable es consistente en las diferentes temporadas y se describe por primera vez, considerando las condiciones climáticas de Chile.

La esterilidad floral presentó una alta correlación negativa con el rendimiento en grano ($r=0,95$; $p<0,01$) (Cuadro 2). Esto es habitual debido a que el rendimiento depende, en gran medida, de la proporción de granos llenos presentes en la panícula. También se observó una significativa correlación entre la esterilidad floral y TCA inicio de panícula-floración (Figura 8B) ($r= 0,81$; $p<0,01$; $R^2= 0,85$). Con ello se comprueba que la esterilidad floral depende de la acumulación de las temperaturas mínimas sobre 10 °C, lográndose determinar que valores de TCA, entre inicio de panícula y floración mayores a 80 °C, podrían evitar una esterilidad floral mayor a 20 %.

El desarrollo fenológico de la variedad 'Zafiro-INIA', en las diferentes fechas de siembra, mostró una correlación positiva y significativa ($r= 0,87$; $p<0,01$), entre RA desde siembra a floración y los días a floración (Figura 8C), con un coeficiente de determinación, $R^2= 0,75$ (Cuadro 2). La correlación positiva entre los días a floración y RA en ese periodo, se explica debido a que las bajas temperaturas de octubre y noviembre, disminuyen el crecimiento y desarrollo de las plantas de arroz sembradas en fechas de siembra temprana, induciendo un aumento en los días a floración y, por ende, una mayor exposición a la radiación solar entre siembra y floración.

Por otro lado, siembras tardías, expuestas a temperaturas mayores desde la siembra, desarrollan todos sus procesos de forma más acelerada, lo que implica una menor exposición a la radiación solar entre siembra y floración. Lo anterior se explica al analizar la correlación entre los días de siembra a floración y GFA siembra-inicio panícula, donde se observa una correlación positiva que implica que la mayor acumulación de temperaturas mínimas menores a 10 °C induce un incremento en los días a floración ($r^2=0,64$; Figura 8D). La correlación de las temperaturas bajo la Temperatura crítica y la floración fue positiva y altamente significativa ($r=0,76$; $p<0,01$; Cuadro 2).

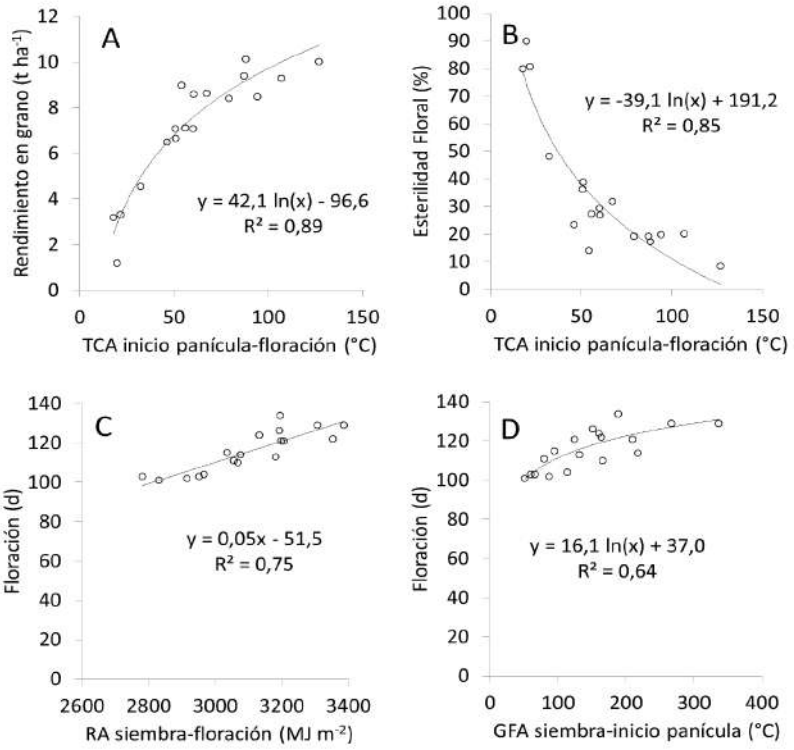


Figura 8. Correlaciones entre variables climáticas y agronómicas en cuatro temporadas del cultivo de arroz. La línea corresponde a la ecuación que explica la variación observada en los datos, y que está expresada en el coeficiente de determinación R^2. A) corresponde a la correlación entre el rendimiento en grano y TCA entre inicio de panícula y floración, B) corresponde a la correlación entre la esterilidad floral y TCA entre inicio de panícula y floración, C) corresponde a la correlación entre los días a floración y RA entre siembra y floración, D) corresponde a la correlación entre los días a floración y GFA entre siembra e inicio de panícula. TCA = Temperatura crítica acumulada (°C). RA= Radiación acumulada (MJ m^{-2}). GFA= Grados frío acumulados (°C).

Cuadro 2. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r) entre variables climáticas y variables agronómicas del cultivo del arroz en Chile, en cuatro temporadas.

	Rendimiento (t ha^{-1})	Esterilidad Floral (%)	Días a Floración (d)	GDA siembra-floración (°C)	GDA siembra -inicio panícula (°C)	GDA inicio panícula-floración (°C)	RA siembra-floración (MJ m^{-2})	RA siembra-inicio panícula (MJ m^{-2})	RA inicio panícula-floración (MJ m^{-2})	GFA siembra-floración (°C)	GFA siembra-inicio panícula (°C)	GFA inicio panícula-floración (°C)	TCA inicio panícula-floración (°C)
Rendimiento (t ha^{-1})	1												
Esterilidad Floral (%)	-0,95 **	1											
Días a Floración (d)	0,44	-0,34	1										
GDA siembra-floración (°C)	0,20	-0,34	-0,36	1									
GDA siembra -inicio panícula (°C)	-0,41	0,34	-0,62 **	0,47 *	1								
GDA inicio panícula-floración (°C)	0,62 **	-0,65 **	0,39	0,30	-0,70 **	1							
RA siembra-floración (MJ m^{-2})	0,10	0,01	0,87 **	-0,45	-0,51 *	0,19	1						
RA siembra-inicio panícula (MJ m^{-2})	-0,45	0,54 *	0,12	-0,35	0,51 *	-0,83 **	0,30	1					
RA inicio panícula-floración (MJ m^{-2})	0,51 *	-0,52 *	0,45	0,05	-0,82 **	0,93 **	0,35	-0,79 **	1				
GFA siembra-floración (°C)	0,16	-0,10	0,70 **	-0,49 *	-0,80 **	0,47 *	0,78 **	-0,12	0,62 **	1			
GFA siembra-inicio panícula (°C)	0,22	-0,15	0,76 **	-0,47 *	-0,78 **	0,46	0,80 **	-0,07	0,59 *	0,99 **	1		
GFA inicio panícula-floración (°C)	-0,30	0,27	-0,06	-0,30	-0,51 *	0,30	0,22	-0,39	0,53 *	0,53 *	0,42	1	
TCA inicio panícula-floración (°C)	0,87 **	-0,81 **	0,65 **	0,09	-0,49 *	0,62 **	0,24	-0,34	0,49 *	0,21	0,28	-0,39	1

Significancia del coeficiente de correlación de Pearson (r=*p<0.05; **p<0.01).

Análisis del efecto de la temperatura en los parámetros del cultivo del arroz en una temporada fría (2009-2010)

El mismo análisis anterior, se realizó en una de las temporadas más frías que ha afectado al cultivo de arroz en Chile (2009-2010), donde se encontró una serie de correlaciones de alto valor agronómico que permite comprender el rol de la radiación solar y la temperatura bajo estas condiciones (Cuadro 3).

Se observó una correlación positiva significativa entre el rendimiento en grano y la variable climática TCA a inicio de panícula-floración (r= 0,95, p<0,05; R^2= 0,91) (Cuadro 3; Figura 9A). Ello permite comprender que el rendimiento en grano es dependiente de temperaturas mínimas que ocurren entre el inicio de la formación de la panícula hasta la floración.

La esterilidad floral se correlacionó negativamente con el rendimiento en grano (r=0,98; p<0,01) (Cuadro 3). Esto es debido a que el rendimiento en grano depende de la proporción de esterilidad floral. También se correlacionó negativamente la esterilidad floral y TCA inicio de panícula-floración (r= 0,99, p<0,01; R^2= 0,98) (Cuadro 3; Figura 9B). Ello permite comprender la dependencia de la acumulación de las temperaturas mínimas superiores a 10 °C sobre la esterilidad floral, lográndose determinar que valores de TCA entre el inicio de panícula y floración, mayores a 80 °C, podrían evitar una esterilidad floral superior a 20 %.

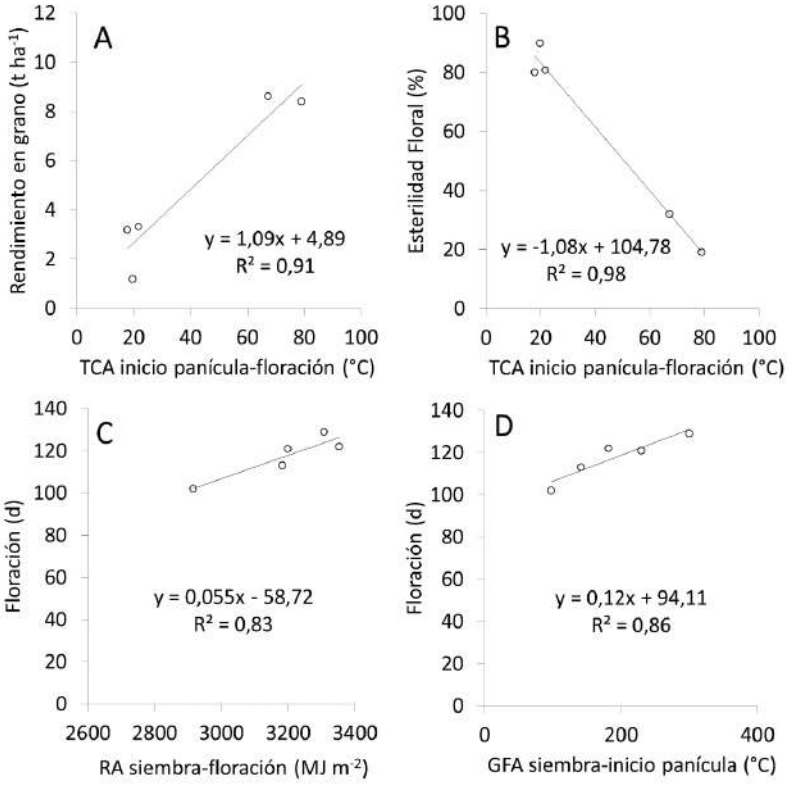


Figura 9. Correlaciones entre variables climáticas y agronómicas en temporada 2009-2010. La línea corresponde a la ecuación que explica la variación observada en los datos y que está expresada en el coeficiente de determinación R^2. A) corresponde a la correlación entre el rendimiento en grano y TCA entre inicio de panícula y floración, B) corresponde a la correlación entre la esterilidad floral y TCA entre inicio de panícula y floración, C) corresponde a la correlación entre los días a floración y RA entre siembra y floración, D) corresponde a la correlación entre los días a floración y GFA entre siembra e inicio de panícula. TCA = Temperatura crítica acumulada. RA= Radiación acumulada (MJ m^{-2}). GFA= Grados frío acumulados (°C).

Se determinó una correlación positiva y significativa entre RA siembra-floración y los días a floración (r= 0,91, p<0,05; R^2= 0,83) (Cuadro 3; Figura 9C). El incremento de los días a floración con mayor RA siembra-floración es debido a que bajas temperaturas de octubre y noviembre, inducen un atraso en la fenología y, por ello, una mayor exposición a la radiación solar entre siembra y floración. Por otro lado, siembras tardías, no expuestas a estas temperaturas, desarrollan su fenología de forma más acelerada, lo que implica una menor exposición a la radiación solar entre siembra y floración. Lo anterior se comprende al analizar la correlación entre los días de siembra a floración y GFA siembra-inicio de panícula, donde se observa una correlación positiva que implica que la mayor acumulación de temperaturas mínimas menores a 10 °C induce un incremento en los días a floración (r^2=0,86; Figura 9D). Esta correlación fue positiva y significativa (r=0,94, p<0,05; Cuadro 3).

Cuadro 3. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r) entre variables climáticas y variables agronómicas del cultivo del arroz en Chile, en temporada 2009-2010.

	Rendimiento (t ha^{-1})	Esterilidad Floral (%)	Días a Floración (d)	GDA siembra-floración (°C)	GDA siembra -inicio panícula (°C)	GDA inicio panícula-floración (°C)	RA siembra-floración (MJ m^{-2})	RA siembra-inicio panícula (MJ m^{-2})	RA inicio panícula-floración (MJ m^{-2})	GFA siembra-floración (°C)	GFA siembra-inicio panícula (°C)	GFA inicio panícula-floración (°C)	TCA inicio panícula-floración (°C)
Rendimiento (t ha^{-1})	1												
Esterilidad Floral (%)	-0,98 **	1											
Días a Floración (d)	0,63	-0,70	1										
GDA siembra-floración (°C)	-0,94 *	0,98 **	-0,57	1									
GDA siembra -inicio panícula (°C)	-0,93 *	0,98 **	-0,67	0,96 *	1								
GDA inicio panícula-floración (°C)	0,90 *	-0,95 *	0,71	-0,91 *	-0,99 **	1							
RA siembra-floración (MJ m^{-2})	0,27	-0,35	0,91 *	-0,19	-0,31	0,37	1						
RA siembra-inicio panícula (MJ m^{-2})	-0,81	0,83	-0,32	0,87	0,91 *	-0,90 *	0,07	1					
RA inicio panícula-floración (MJ m^{-2})	0,87	-0,93 *	0,75	-0,88 *	-0,97 **	1,00 **	0,44	-0,86	1				
GFA siembra-floración (°C)	0,83	-0,90 *	0,93 *	-0,82	-0,89 *	0,90 *	0,70	-0,62	0,92 *	1			
GFA siembra-inicio panícula (°C)	0,82	-0,90 *	0,94 *	-0,82	-0,88	0,88 *	0,71	-0,60	0,90 *	1,00 **	1		
GFA inicio panícula-floración (°C)	0,86	-0,93 *	0,85	-0,86	-0,95 *	0,97 **	0,58	-0,76	0,98 **	0,98 **	0,97 **	1	
TCA inicio panícula-floración (°C)	0,95 *	-0,99 **	0,67	-0,99 *	-0,97 **	0,93 *	0,32	-0,82	0,90 *	0,89 *	0,89 *	0,91 *	1

Significancia de coeficiente de correlación de Pearson: *p<0.05; **p<0.01.

Análisis de la interacción genotipo por ambiente

En Chile, el cultivo del arroz se desarrolla en dos regiones administrativas, Región del Maule (Linares-Parral) y Región de Ñuble (Ñiquén-San Nicolás), que poseen diferentes órdenes de suelos (Inceptisols, Alfisols y Vertisols) (Hirzel et al., 2011) y algunas diferencias climáticas. Por ello, es necesario estudiar el comportamiento de las variedades recomendadas en estos ambientes, para conocer si éstas poseen una adaptación general o específica a estas localidades, y en base a esos resultados, realizar las recomendaciones pertinentes. Uno de los análisis que permite comprender este problema es la interacción genotipo por ambiente, con el cual se puede evaluar la estabilidad de los genotipos de arroz (Colombari et al., 2013). Dentro de ese análisis se pueden utilizar diferentes herramientas estadísticas, como el biplot GGE, que muestra el comportamiento de los diferentes genotipos (variedades y/o líneas experimentales) en los disímiles ambientes (localidades) evaluados y su interacción. Con ello, se pueden identificar genotipos con gran potencial de rendimiento y estabilidad en los diferentes mega-ambientes (Samonte et al., 2005; Karimizadeh et al., 2013). Para realizar este estudio se evaluaron 10 genotipos (variedades y líneas experimentales) en tres localidades (Chillán, San Carlos y Parral) durante tres temporadas (Donoso et al., 2016). Los resultados del estudio indicaron que los rendimientos obtenidos variaron entre los 8,3 y 10,0 t ha^{-1} (Figura 10) y la esterilidad floral en promedio fluctuó entre 7 % y 20 %.

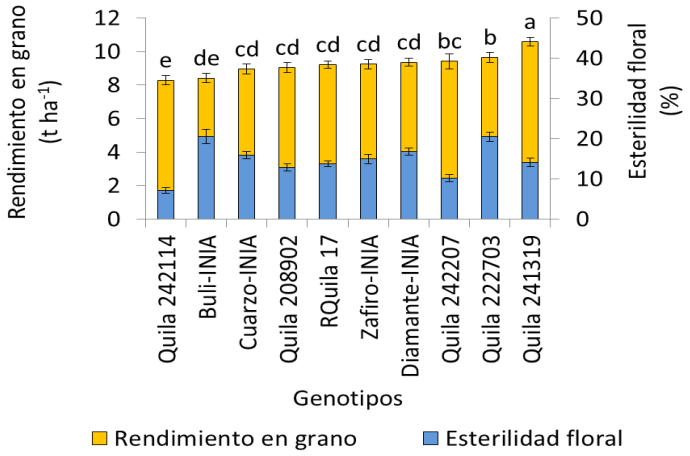


Figura 10. Rendimiento y esterilidad floral de los genotipos evaluados. Las barras de error corresponden al error estándar de tres repeticiones. Letras diferentes corresponden a diferencias significativas en el rendimiento en grano (LSD Fisher P<0,05).

El análisis de la interacción genotipo por ambiente logró demostrar que solamente había un mega ambiente en donde destacó la línea experimental Quila 241319 (Figura 11). La distancia entre la ubicación de genotipo en el biplot y la media de rendimiento entre ambientes (línea punteada), representa la estabilidad de este genotipo (Figura 12). Este análisis permitió también diferenciar a la línea experimental Quila 241319 del resto de los genotipos, y posibilitó el lanzamiento de este genotipo como la primera variedad de arroz de grano medio, apta para sushi y risotto, llamada ´Platino-INIA` (Paredes et al., 2016).

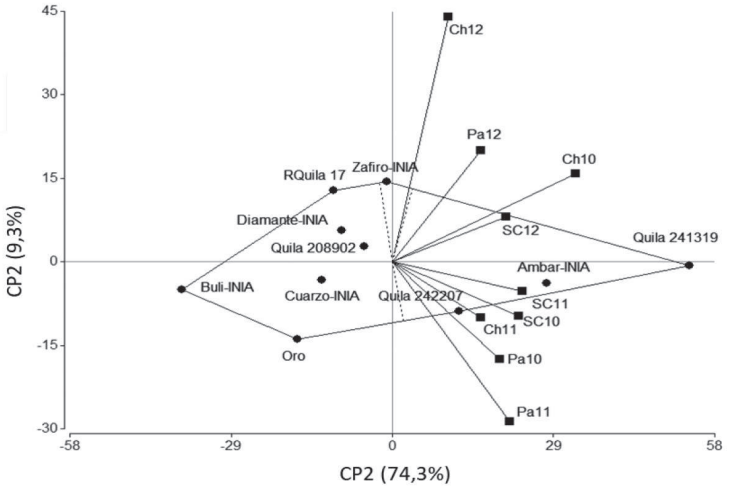
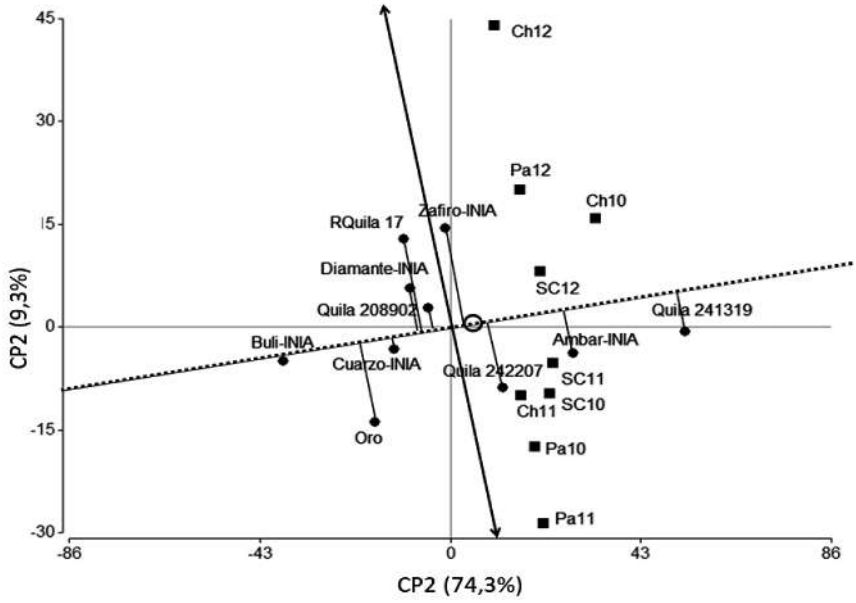


Figura 11. Biplot GGE del rendimiento en grano de genotipos de arroz. Los cuadrados negros indican los nueve ambientes y los círculos negros, corresponden a los genotipos evaluados. La línea punteada corresponde a la división de los mega-ambientes. Ch10, Ch11 y Ch12 corresponden a la localidad de Chillán en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. SC10, SC11 y SC12, corresponden a la localidad de San Carlos, en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. Pa10, Pa11 y Pa12, corresponden a la localidad de Parral en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente.



Fuente: Donoso et al., 2016.

Figura 12. Biplot GGE para análisis de la estabilidad del rendimiento de los genotipos evaluados. El círculo central, corresponde a la media de todos los ambientes y la línea punteada corresponde a la media de rendimiento entre los ambientes. Los cuadrados negros indican los nueve ambientes y los círculos negros corresponden a los genotipos evaluados. Ch10, Ch11 y Ch 12 corresponden a la localidad de Chillán en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. SC10, SC11 y SC12, corresponden a la localidad de San Carlos, en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. Pa10, Pa11 y Pa12, corresponden a la localidad de Parral en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente.

Recomendaciones para evitar el daño por bajas temperaturas en el cultivo del arroz

Una de las medidas más adecuadas para reducir los efectos de las bajas temperaturas es sembrar temprano, durante octubre (Figura 13). De esta manera, la planta de arroz puede crecer y desarrollarse en condiciones de temperatura y radiación favorables, lo que finalmente se ve reflejado en el rendimiento en grano paddy. Además, la siembra temprana permite obtener una mejor calidad industrial del grano. Siembras realizadas en octubre logran mejor calidad industrial que siembras realizadas en noviembre, lo que puede significar pérdidas cercanas a un 64 % de grano entero por hectárea, por presencia de mayor cantidad de grano verde y manchado (Alvarado y Hernaíz 2007). Además, se ha registrado, en algunos casos, un mayor porcentaje de panza blanca, debido a las altas temperaturas y al menor período de llenado del grano en siembras tardías.

Según lo observado en una de las temporadas más frías para el cultivo del arroz, se recomienda la realización de siembras hasta el 20 de octubre. Con posterioridad a esa fecha, es probable un fuerte descenso en los rendimientos en años de características similares a la temporada 2009-2010. Además, es importante mencionar que, en caso de año normal, tampoco es recomendable la realización de siembras posteriores al 10 de noviembre, donde el riesgo de pérdidas de rendimiento puede ser muy importante, alrededor de 0,1 t ha^{-1} de arroz por día de retraso (Alvarado y Hernaíz, 2007). Esto se debe a que siembras tardías (después del 10 de noviembre) favorecen el atraso de la floración de la planta hasta febrero-marzo, cuando las temperaturas y radiación solar no son óptimas para el desarrollo del cultivo.

Figura 13. Fecha de siembra recomendada para el cultivo del arroz en Chile. En color verde se representan las fechas óptimas, en amarillo las fechas con riesgo, y en rojo las fechas de alto riesgo de reducción de rendimiento en grano.

Consideraciones finales

Chile es el país arrocero más austral del mundo, con el desafío de producir arroz en condiciones de frío. La instalación de estaciones meteorológicas automáticas de referencia en toda la región arrocera de Chile, ha permitido cuantificar las relaciones y los efectos del clima en el cultivo de arroz a nivel local. Asociado a lo anterior, se muestra que la fecha óptima de siembra (inicios de octubre) y el manejo del riego (lámina de agua), especialmente en la etapa reproductiva del arroz, son fundamentales para mitigar los efectos nocivos del clima para este cultivo.

Finalmente, la relación entre el clima y el crecimiento y desarrollo del arroz en Chile, descrita en este capítulo, es en respuesta a las continuas necesidades del rubro. Además, representa una guía para futuros estudios, que busquen mejorar la sustentabilidad de este cultivo en el país.

Referencias

Alvarado, R. 1999. Influence of air temperature on rice population, length of period from sowing to flowering and spikelet sterility. p. 63-68. In Hill, J.E., and Hardy, B. (ed.) Proceedings of the Second Temperate Rice Conference, Sacramento, California, USA.

Alvarado, R., Hernaíz. S. 2007. Variedades, siembra, semilla certificada, dosis de semilla y época de siembra. p. 21-38. En Alvarado, R. (ed.) Arroz Manejo Tecnológico. Boletín INIA Nº162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Baruah, A.R., Ishigo-Oka, N., Adachi, M., et al. 2009. Cold tolerance at the early growth stage in wild and cultivated rice. Euphytica 165:459-470.

Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M., Tuong, T.P. 2007. Water Management in Irrigated Rice: coping with water scarcity. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.

Castillo, D., Alvarado, J. 2002. Caracterización de germoplasma de arroz para tolerancia a frío en la etapa de germinación. Agric. Téc. (Chile) 62:596-605.

Coast, O., Murdoch, A.J., Ellis, R.H., et al. 2015. Resilience of rice (*Oryza* spp.) pollen germination and tube growth to temperature stress. Plant Cell Environ. 39:26-37.

Colombari, F., de Resende, M.D.V., de Morais, O.P., et al. 2013. Upland rice breeding in Brazil: a simultaneous genotypic evaluation of stability, adaptability and grain yield. Euphytica 192:117-129.

CSIRO. 2008. Water availability in the Murray-Darling Basin. A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project, Australia.

Donoso, G., Cabas P., Paredes M., et al. 2015. Cold tolerance evaluation of temperate rice (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*) genotypes at the seedling stage. Gayana Bot. 72:1-13.

Donoso, G., Leyton, M., Paredes, M., et al. 2014. Relative expression of genes related with cold tolerance in temperate rice at seedling stage. Afr. J. Biotechnol. 13:2506-2512.

Donoso, G., Paredes, A. 2015. Efecto de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz. p. 18-21. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Donoso, G., Paredes, M., Arbiza, O., et al. 2013. Cold tolerance evaluation of Chilean rice (*Oryza sativa* L.) genotypes at germination stage. Chil. J. Agric. Res. 73:3-8.

Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V., et al. 2016. GGE biplot analysis of multi-environment yield trials of rice produced in a temperate climate. Chil. J. Agric. Res. 72:152-157.

Fuentealba-Sandoval, V., Finot, V., Wilckens, R., et al. 2014. Efectos de la disminución de temperatura sobre el desarrollo de la pared de la antera y el grano de polen en *Oryza sativa* L. Gayana Bot. 71:199-215.

Garreaud, R., Boisier, J., Montecinos, A., et al. 2019. The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. Int. J. Climatol. 40:421-439.

Gaydon, D.S., Beecher, H.G., Reinke, R., et al. 2010. Rice. p. 67-83. In Stokes, C.J., Howden, S.M. (eds.) Adapting Australian agriculture to climate change (Chapter 5). CSIRO Publishing, Clayton, Australia.

Grohs, M., Marchesan, E., Roso, R., et al. 2016. Attenuation of low-temperature stress in rice seedlings. Pesq. Agropec. Trop. 46:197-205.

Hirzel, J., Pedreros, A., Cordero, K. 2011. Effect of nitrogen rates and split nitrogen fertilization on grain yield and its components in flooded rice. Chil. J. Agric. Res. 71:437-444.

INE. 2020. Estimación de superficie, producción y rendimiento. Instituto Nacional de Estadística (INE), Santiago, Chile.

Karimizadeh, R., Mohammadi, M., Sabaghni, N., et al. 2013. GGE biplot analysis of yield stability in multi-environment trials of lentil genotypes under rainfed condition. Not. Sci. Biol. 5:256-262.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., et al. 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z. 15:259-263.

Liu, B., Mo, W.J., Zhang, D., et al. 2019. Cold influences male reproductive development in plants: a hazard to fertility, but a window for evolution. Plant Cell Physiol. 60:7-18.

McMaster G.S., Wilhelm, W.W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. Agric. For. Meteorol. 87:291-300.

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2016. Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. Sci. Adv. 2:e1500323.

Nishiyama, I. 1995. Science of the rice plant. p. 769-793. In Matsuo, T., Kumazawa, K., Ishii, R., et al. (eds.) Food and Agriculture Policy Research Center, Tokio, Japan.

Novoa, R., Villaseca, S., del Canto, P., et al. 1989. Mapa agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

Ortega, R. 2007. Analysis of factors affecting spikelet sterility in flooded rice under field conditions in Chile. Arch. Agron. Soil Sci. 53:183-192.

Ortega, R., Aresti, M., Pereira, I. 2011. Implementation and evaluation of an image analysis system for determining viability of pollen grains in temperate rice. Chil. J. Agric. Res. 71:16-22.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2016. Platino-INIA. Nueva variedad de arroz grano medio. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu. www.semillas.inia.cl.

Samonte, S.O.P.B., Wilson, L.T., McClung, A.M., et al. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analysis. Crop Sci. 45:2414-2424.

Satake, T., Hayase, H. 1970. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants: V. Estimations of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness. Jpn. J. Crop Sci. 39:468-473.

Shakiba, E., Edwards, J.D., Jodari, F., et al. 2017. Genetic architecture of cold tolerance in rice (*Oryza sativa*) determined through high resolution genome-wide analysis. PLoS ONE 12:e0172133.

Tuong, T.P., Bouman B.A.M. 2003. Rice production in water scarce environments. p. 53-67. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (eds.) Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. CABI Publishing, Wallingford, UK.

Williams, R.L., Angus, J.F. 1994. Deep floodwater protects high nitrogen rice crops from low temperature damage. Aust. J. Exp. Agric. 34:927-932.

Yoshida, S. 1981. Climatic environment and its influence. p. 65-110. In: Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, Philippines.

Capítulo 6. Los suelos arroceros chilenos

Juan Hirzel C.

Los suelos de aptitud arrocera en Chile se localizan al poniente del valle central, cerca de la Cordillera de la Costa, desde la provincia de Santiago a la Región de Ñuble. Se trata de terrenos de posición baja, con textura arcillosa a franco arcillosa, substrato impermeable constituido normalmente por una matriz de suelo con mayor porcentaje de arcilla que el horizonte superior, o por estratas compactadas en la categoría de fragipán o duripán que limitan el drenaje dentro del perfil de suelo, manteniendo el agua en su interior, lo que permite la inundación permanente del cultivo de arroz. El origen de estos suelos puede variar, dependiendo de su ubicación, entre sedimentario aluvial o lacustre o semilacustre, pudiendo o no descansar sobre un substrato derivado de toba volcánica (roca volcánica formada por productos piroclásticos consolidados), aunque generalmente corresponden a un depósito de material fino sedimentario, de origen lacustre o semilacustre, que descansa sobre toba volcánica.

La topografía es plana a suavemente ondulada. La permeabilidad es lenta, lo cual genera un drenaje pobre. El escurrimiento superficial también es lento. El nivel freático puede fluctuar entre 20 a 80 cm, según la ubicación y la época.

Dentro de la clasificación técnica de suelos, los suelos de aptitud preferentemente arrocera pertenecen, principalmente, a la clase V, caracterizados por presentar poca pendiente y severos problemas de drenaje.

En términos taxonómicos, el cultivo de arroz en Chile puede sembrarse en 3 órdenes de suelo: Inceptisoles, Alfisoles y Vertisoles (López, 1991; USDA, 1994; CIREN, 1997), cuyas características principales se describen a continuación.

Los suelos arroceros del orden Inceptisol, Alfisol y Vertisol de Chile son formados por depósitos sedimentarios de origen fluvio glacial y volcánico, principalmente derivados de la cordillera de Los Andes.

En general, los Inceptisoles son suelos débilmente desarrollados que pueden presentar un epipedón óchrico (suelo de origen mineral, con un horizonte obscuro muy delgado) con un relativamente bajo contenido de materia orgánica, un horizonte B débilmente desarrollado, también llamado horizonte cámbico, que no presentan propiedades ándicas asociadas con los Andisoles.

Los suelos Alfisoles presentan mayor grado de desarrollo que los suelos Inceptisoles. Pueden presentar un epipedón óchrico con relativamente bajo contenido de materia orgánica, el cual descansa sobre un horizonte B bien desarrollado (horizonte argílico o de acumulación de arcillas). Una característica propia de estos suelos Alfisoles es que el horizonte B debe presentar un contenido de arcillas 30 % superior al horizonte A, además de una saturación de bases mayor a 35 % en la zona más baja del perfil.

Los suelos Vertisoles presentan arcillas de color obscuro con alto coeficiente de expansión y contracción (arcillas 2:1 o expandibles) frente a cambios en el nivel de humedad del suelo, como consecuencia de su alto contenido de arcillas del tipo ´esmectita`. Los procesos de expansión y contracción de estos suelos generan fracturas conocidas como ´Slikensides` que a su vez permiten el movimiento de partículas superficiales hacia el fondo de las grietas y, con ello, una mezcla de partículas desde diferentes posiciones dentro del perfil de suelo. Este proceso también recibe el nombre de ´argilipedoturbación´. El microrelieve puede ser ondulado y las depresiones pueden acumular agua en periodos de lluvia, resultando en mayor crecimiento vegetativo y en acumulación de materia orgánica en comparación a sectores de mayor altitud dentro del microrelieve (Soil Survey Staff, 1999; Buol et al., 2003).

Las propiedades químicas se presentan en otro de los capítulos de este libro, pero en general se trata de suelos de baja fertilidad, en relación a suelos en los cuales se desarrollan otros cultivos.

En las Figuras 1 a 5 se observan perfiles característicos de suelos arroceros de los órdenes Inceptisol, Alfisol y Vertisol de la zona productora de arroz de Chile.

Las principales series de suelos en las cuales se cultiva arroz, corresponden a las series Quilmén (Inceptisol), Parral (Alfisol), Quella (Vertisol), Palmilla (Vertisol), Villaseca (Vertisol).

Serie Quilmén

Símbolo cartográfico: QUM

La serie Quilmén es miembro de la familia fina, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts (Inceptisol).

Son suelos con algunas características vérticas y por ello no muestran diferencias en los pedones por efecto del movimiento rotativo de las arcillas que son del tipo montmorillonítico (2:1). Aparentemente, estos suelos derivan de tobas volcánicas depositadas en condiciones de aguas tranquilas, posiblemente lacustrinas. Son suelos profundos, arcillosos, no estructurados (macizas), de permeabilidad lenta y drenaje imperfecto a moderado. Generalmente no presentan nivel freático desde principios de primavera hasta inicios de otoño. Ocupan una posición plana y deprimida. La profundidad efectiva puede variar desde 80 a 140 cm. Se presentan en una topografía plana con pendiente dominante de 0 % a 2 %. Son suelos muy homogéneos y no presentan variaciones de importancia. En los horizontes superficiales el color es pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR, con croma 2 y valores que varían entre 4 y 2. Su textura es franco arcillo limosa.

En profundidad, el color es gris oscuro en el matiz 5YR, con croma 3 y valores que varían entre 2 y 3, y la textura es franco arcillo limosa.

Las capacidades de uso pueden variar desde III a VI. La categoría de riego puede variar desde 3 a 4. La clase de drenaje fluctúa entre 3 y 4, y su aptitud frutal es E.

Serie Parral

Símbolo cartográfico: PRL

La serie Parral tiene la clasificación taxonómica Palexeralfs (Alfisol).

Son suelos sedimentarios, presumiblemente derivados de toba volcánica, en posición de terraza remanente. En superficie, la textura es franco arcillosa y el color es pardo rojizo oscuro. En profundidad la textura es arcillosa, de color pardo rojizo oscuro, descansando sobre un substratum constituido por toba volcánica. Es un suelo de topografía plana, moderadamente profundo, de drenaje moderado, permeabilidad moderadamente lenta y escurrimiento superficial muy lento.

La profundidad efectiva del suelo varía entre 30 y 85 cm, que puede verse limitada por la presencia de napa freática que limita el desarrollo de raíces. El drenaje varía desde moderado a pobre. La topografía varía desde plana a suavemente ondulada, con pendientes simples y complejas que oscilan entre 0,5 % y 5,0 %.

En los horizontes superficiales el color es pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR, con croma 2 y valores que varían entre 4 y 2, y su textura es franco arcillosa. En profundidad el color es rojo amarillento en el matiz 5YR, con croma 3 y valores que varían entre 4 y 6. La textura es franco arcillosa.

Las capacidades de uso pueden variar desde II a VI. La categoría de riego puede variar desde 3 a 4, la clase de drenaje fluctúa entre 3 y 4, y su aptitud frutal fluctúa desde C a E.

Serie Quella

Símbolo cartográfico: QLA

La serie Quella es miembro de la familia fina, esmectítica, térmica de los Aquic Durixererts (Vertisol).

Son suelos de posición baja de plano depositacional (lacustrino); de textura franco arcillosa y color pardo grisáceo muy oscuro en superficie; de textura arcillosa (arcilla densa) y color gris oscuro en profundidad. Presenta estructura prismática gruesa. Suelo de topografía plana, de permeabilidad lenta, drenaje imperfecto y escurrimiento superficial muy lento. Substrato de toba volcánica.

La profundidad efectiva varía desde 40 a 70 cm, siendo limitada por arcillas densas y presencia de toba volcánica. La topografía es plana a casi plana, con pendientes simples y complejas que varían entre 0,5 % y 3,0 %.

El horizonte A puede faltar y estar incluido en el horizonte inferior (propiedades vérticas). Presenta colores pardo grisáceo muy oscuro a gris muy oscuro en el matiz 10YR. El valor varía entre 3 y 5 con croma 1 o 2.

Las capacidades de uso pueden variar desde III a IV y la categoría de riego puede variar desde 3 a 4. La clase de drenaje fluctúa entre 2 y 3, y su aptitud frutal es E.

Serie Palmilla

Símbolo cartográfico: PAL

La serie Palmilla tiene la clasificación taxonómica Pelloxererts (Vertisol).

Son suelos sedimentarios de origen lacustrino; de textura franco arcillo limosa y color gris oscuro en superficie; de textura arcillosa (arcilla densa) y color gris oscuro en profundidad. Presenta estructura prismática gruesa en superficie y estructura maciza en profundidad. Suelo de topografía plana, de permeabilidad muy lenta, drenaje imperfecto y escurrimiento superficial muy lento. Substrato de toba volcánica.

La profundidad efectiva varía desde 5 a 55 cm, siendo limitada por un horizonte arcilloso o arcillo limoso compactado, con saturación en gran parte del año, originando un nivel freático casi permanente. La topografía es plana, con pendientes simples y complejas que varían entre 0 % y 1,5 %. Ocasionalmente presenta inundaciones temporales.

El horizonte A puede faltar y estar incluido en el horizonte inferior (propiedades vérticas). Presenta colores pardo grisáceo muy oscuro a gris muy oscuro en el matiz 10YR. El valor varía entre 3 y 4 con croma 1.

Las capacidades de uso pueden variar desde III a VI y la categoría de riego puede variar desde 3 a 4. La clase de drenaje fluctúa entre 2 y 3, y su aptitud frutal es E.

Serie Villaseca

Símbolo cartográfico: VIC

La serie Villaseca tiene la clasificación taxonómica Pelloxererts (Vertisol).

Son suelos sedimentarios de origen lacustrino, de textura franco arcillo limosa y color gris oscuro en superficie, textura arcillosa (arcilla densa) y color pardo pálido en profundidad. Presenta estructura de bloques sub angulares medios y gruesos en superficie y estructura maciza en profundidad. Suelo de topografía plana, de permeabilidad muy lenta, drenaje imperfecto y escurrimiento superficial lento. Substrato de toba volcánica.

La profundidad efectiva varía desde 20 a 55 cm, siendo limitada por un horizonte arcilloso mal estructurado, con saturación en gran parte del año, originando un nivel freático casi permanente. La topografía es plana a casi plana, con pendientes simples y complejas que varían entre 0,5 % a 9 %.

El horizonte A puede faltar y estar incluido en el horizonte inferior (propiedades vérticas). Presenta colores pardo grisáceo muy oscuro a gris muy oscuro en el matiz 10YR. El valor varía entre 3 y 4 con croma 1.

Las capacidades de uso pueden variar desde IV a VI, mientras que la categoría de riego puede variar desde 3 a 4. La clase de drenaje fluctúa entre 2 y 3, y su aptitud frutal es E.

Figura 1. Suelo Inceptisol, Región del Maule.

Figura 2. Suelo Alfisol, Región del Maule.

Figura 3. Suelo Alfisol, Región del Maule.

Figura 4. Suelo Alfisol, Región de Ñuble.

Figura 5. Suelo Vertisol, Región del Maule.

Referencias

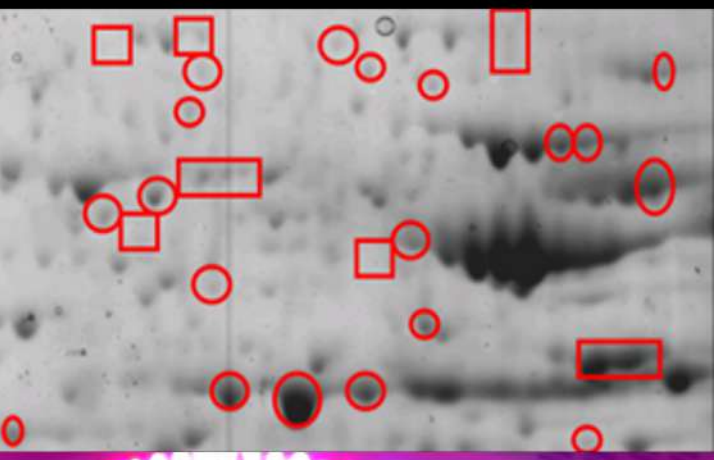
Buol, S., Southard, R., Graham, R., et al. 2003. Soil genesis and classification. 5th ed. Iowa State Press, Ames, Iowa, USA.

CIREN. 1997. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico VII Región: Publicación Nº 117. 659 p. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile.

López, B. 1991. Cultivos herbáceos. Vol. 1, Cereales. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.

Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 5th ed. Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington, DC, USA.

USDA. 1994. Reference to soil taxonomy. USDA, Washington, DC, USA.



SECCIÓN III. TOLERANCIA AL FRÍO

Capítulo 7. Tolerancia al frío en el cultivo del arroz en el mundo

Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Maribel Cruz G.

El arroz (*Oryza sativa* L.) es una de las principales fuentes de alimentación para la población mundial y está sujeto a una demanda cada vez más difícil de cubrir (Khush, 1997; Cantrell y Reeves, 2002). Este cultivo es sensible a las bajas temperaturas y crece en regiones tropicales, subtropicales y templadas (Biswas et al., 2019). Se considera que el cultivo del arroz crece en condiciones óptimas entre los 25 y 35 °C y temperaturas mínimas críticas de crecimiento que varían según el estado de desarrollo (Biswas et al., 2019). Las bajas temperaturas son un importante factor limitante respecto a la productividad del cultivo y restringe su ubicación geográfica (Xin y Browse, 2001). Éste es un problema que afecta, principalmente, a regiones montañosas de los trópicos y regiones templadas (Xie et al., 2012). En el ámbito mundial, 15 millones de hectáreas en África, Asia, Australia, Europa y América del Sur y del Norte son afectadas por las bajas temperaturas cada año, lo que resulta en una pérdida de rendimiento anual de 1,0 a 3,9 t ha^{-1} (Jena y Hardy, 2012; Hyun et al., 2016). En Australia, la variación en los rendimientos promedio se debe en especial a eventos de temperatura inferiores a 15 °C durante la etapa reproductiva del cultivo, donde es común que las temperaturas sean tan bajas como a 11 o 12 °C (Reinke et al., 2012). En Bután, país ubicado al sur de la China y al norte de la India, el patrón de temperaturas es bajo-alto-bajo, como en Japón, el norte de China y Corea, donde la baja temperatura es un problema en la etapa temprana de crecimiento y también en la etapa reproductiva y de maduración. En Japón, 1,6 millones de hectáreas plantadas con arroz están expuestas a bajas temperaturas del verano. En Corea, donde se cultivan alrededor de un millón de hectáreas, los daños por frío pueden presentarse en la primavera y el otoño. En Nepal, 1,5 millones de hectáreas son amenazadas por bajas temperaturas. El clima frío recurrente con temperaturas de 8 a 10 °C (al inicio de la etapa vegetativa) hasta 13 a 15 °C (durante la floración y maduración) son las que afectan el arroz en Rusia. En California (U.S.A.), al igual que en Uruguay, el desafío relacionado con el clima es el vigor de las plántulas y la tolerancia al frío, tanto en estado vegetativo como en el reproductivo para ganar estabilidad en el rendimiento. En Chile, el país mas austral del mundo donde se cultiva el arroz (Donoso et al., 2014), tiene temperaturas mínimas inferiores a 10 °C durante la etapa vegetativa e inferiores a 15 °C, durante la etapa reproductiva (Donoso et al., 2015). En los distritos del norte de Bangladesh, el arroz se afecta por el frío durante el establecimiento y la etapa reproductiva del cultivo y la mortalidad de las plántulas puede llegar hasta el 90 %. Dos millones de hectáreas de arroz en el norte y el noreste de Bangladesh se han visto afectadas por una fuerte ola de frío que causa pérdidas parciales o totales del cultivo (Rashid y Yasmeen, 2018).

Aumentar la producción de arroz en todo el mundo, incrementando la superficie sembrada es altamente improbable, pudiéndose generar un escenario de escasez alimentaria (Khush, 1997). Por ello, la sustentabilidad de la producción de arroz depende del desarrollo de nuevos cultivares de arroz, con rendimientos altos y estables, y tolerantes al frío, entre otros factores.

Efectos de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz

Las bajas temperaturas son una de las principales limitantes para el rendimiento de los cultivos en el mundo (Sanghera et al., 2011). Particularmente en el caso del arroz, éstas afectan el crecimiento, desarrollo y potencial de rendimiento de la planta. En general, el arroz es susceptible a temperaturas inferiores a 15 °C (Howarth y Ougham, 1993; Fujino et al., 2004). Los efectos de las bajas temperaturas en el cultivo dependen de la etapa de desarrollo, intensidad y tiempo de exposición (Díaz et al., 2006). La exposición a bajas temperaturas causa cambios fisiológicos en el cultivo (de los Reyes et al., 2003; Aghaee et al., 2011), como la disminución del contenido total de

clorofila (Aghaee et al., 2011), inhibición de la actividad fotosintética (Allen y Ort, 2001; Díaz et al., 2006; Suzuki et al., 2008), y estrés oxidativo (Apel y Hirt, 2004).

Efecto de las bajas temperaturas en la etapa de germinación

En la etapa de germinación, la temperatura mínima crítica para su desarrollo es de 10 °C (Yoshida, 1981). La germinación ocurre idealmente entre 18 y 33 °C (Biswas et al., 2019). Las semillas tienen un papel esencial en el ciclo de vida de las plantas (He et al., 2011). En condiciones óptimas, las semillas pueden iniciar la actividad metabólica relacionada con la movilización de reservas, la biosíntesis de nuevas proteínas y la regeneración de la membrana celular (He y Yang, 2013). Este proceso comienza con la captación de agua (fase I), la reactivación del metabolismo (fase II) y la emergencia de la radícula (fase III). La fase II es la etapa más crítica, durante la cual se reactivan todas las vías metabólicas y procesos fisiológicos necesarios (He et al., 2011). La germinación es un proceso complejo que involucra muchos eventos relacionados con genes, proteínas y metabolitos. Sin embargo, muchos aspectos de este proceso aún son desconocidos. Durante el proceso de germinación, la mitocondria es una de las principales fuentes de especies reactivas de oxígeno (ROS), que generan superóxido y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), y también los glioxisomas que producen una alta cantidad de H_2O_2 a través de la enzima glicolato oxidasa (El-Maarouf-Bouteau y Bailly, 2008). Otra fuente de radicales superóxidos son las NADPH oxidasas ubicadas en la membrana plasmática. Las moléculas de ROS como el radical hidroxilo ($^{\cdot}HO$), H_2O_2 y los radicales superóxidos (O_2^{-}) pueden causar estrés oxidativo en la célula vegetal (Bailly, 2004; Rinalducci et al., 2008), lo que induce daño a componentes celulares tales como proteínas, lípidos y ADN (Mittler, 2002; Apel y Hirt, 2004). Este estrés puede causar la modificación de proteínas que producen una modificación postraduccional (Moller et al., 2007). Estas modificaciones son extremadamente importantes, porque pueden alterar las propiedades físicas y químicas, plegamiento, conformación, distribución, estabilidad, actividad y, en consecuencia, las funciones de las proteínas (Woodi et al., 2009). Algunos estudios han demostrado que las ROS tienen un papel importante al comienzo de la germinación (Yin et al., 2009). Sin embargo, es necesario un equilibrio complejo entre ROS y mecanismos antioxidantes para la supervivencia de las semillas y el logro de la germinación (Bailly, 2004). Las plantas han desarrollado numerosos mecanismos para mantener este equilibrio. Algunos de ellos están asociados con sistemas eliminadores de ROS, enzimáticos y no enzimáticos (Pradedova et al., 2011).

Metodologías para la evaluación de la tolerancia al frío en la etapa de germinación

Respecto a la evaluación de la tolerancia al frío en la etapa de germinación, hay diversas metodologías que van desde 10 hasta 17 °C, siendo el más común 15 °C por 7 a 12 d (Cuadro 1). La evaluación normalmente consiste en la determinación del porcentaje de germinación, pero también existen casos en los que se determina el largo del coleóptilo. Este tipo de evaluaciones se realiza en condiciones de cámara en un laboratorio.

Mapeo de caracteres cuantitavivos (QTLs) y tolerancia al frío en el arroz

La tolerancia al frío en el cultivo del arroz es una característica cuantitativa controlada por múltiples genes. Por lo tanto, es complejo asociar directamente genes responsables de la tolerancia al frío. Para ello, estrategias para el desarrollo de marcadores moleculares y mapas de ligamiento han hecho posible la creación de una verdadera ´cartografía genética` y han obtenido un mapeo de los cromosomas, donde se ubican diversos *loci* de carácter cuantitativo (quantitative trait loci, QTLs), como es la tolerancia al frío. Esto ha permitido el desarrollo de estrategias como la selección asistida por marcadores, con lo que se eligen cultivares con la mayor cantidad de QTLs relacionados con tolerancia a bajas temperaturas. Para ello, se han desarrollado y mapeado los cromosomas de

poblaciones obtenidas de cruzamientos de genotipos con tolerancia a frío contrastante, lo que permite encontrar QTLs adecuados (Zhang et al., 2014a).

Mapeo de caracteres cuantitavivos (QTLs) relacionados con tolerancia al frío en la etapa de germinación

Los análisis muestran que múltiples genes controlan la germinación en condiciones de bajas temperaturas. La estrategia para encontrar los QTLs está resumida en el Cuadro 2. Los principales QTLs han sido encontrados en los cromosomas 2, 3, 4, 5, 7 y 8. Las principales metodologías utilizadas en germinación, para establecer los QTLs que tienen una variación explicada de al menos 15 %, fueron obtenidos con evaluaciones a 15 °C. En las evaluaciones se determinó el efecto de las bajas temperaturas en la velocidad de germinación o porcentaje de germinación.

Evaluación de genes relacionados con tolerancia al frío en etapa de germinación

En el caso de la etapa de germinación, existen pocos antecedentes relacionados con la evaluación de genes que confieren tolerancia en esta etapa. Dentro de ellos se encuentra un gen relacionado con el incremento en la velocidad de germinación (*OsGST*; Takesawa et al., 2002) (Cuadro 3).

Cuadro 1. Metodologías para la evaluación de la tolerancia al frío en el cultivo del arroz en la etapa de germinación.

Metodología	Referencia
Germinación a 10, 15, 20 y 25 °C por 3 a 30 d.	Bertin et al., 1996
Germinación a 17 °C por 7 d.	Sthapit y Witcombe, 1998
Germinación a 13 °C y a 15 °C por 7 d.	Lee, 2001
Germinación a 15 °C por 4 d.	Miura et al., 2001
Largo del coleóptilo tras germinación a 15 °C por 10 d.	Hou et al., 2003
Germinación a 15 °C por 7 d.	Fujino et al., 2004
Germinación a 15 °C por 10 d.	Zhang et al., 2005
Germinación a 15 °C por 6 d.	Chen et al., 2006
Germinación a 15 °C por 7 a 15 d.	Jiang et al., 2006
Germinación a 14 °C por 7 a 17 d.	Han et al., 2006
Germinación a 15 °C por 10 d.	Ji et al., 2008
Largo del coleóptilo posterior a tratamiento de 13 °C por 4 d.	Donoso et al., 2013
Germinación a 15 °C por 4 a 5 d.	Li et al., 2013
Germinación a 15 °C por 12 d.	Ranawake et al., 2014
Germinación a 15 °C por 5 d.	Satoh et al., 2016
Germinación a 14 °C por 12 d.	Wang et al., 2016
Germinación a 15 °C por 7 y 8 d.	Jiang et al., 2017
Germinación a 15 °C por 7 d.	Yang et al., 2018

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Cuadro 2. Estudio de QTLs relacionados con la tolerancia al frío en la etapa de germinación.

Cromosoma (N°)	Nombre del QTL	Varianza fenotípica (%)	Método de evaluación	Referencias
2	*qLTG2*	27,7	Porcentaje de germinación a 15 °C.	Hou et al., 2003
3	*qLTG 3 1*	35,1	Germinación a 15 °C.	Fujino et al., 2004
3	*qLTG 3 2*	17,4	Germinación a 15 °C .	Fujino et al., 2004
2, 7	*qLVG2, qLVG7-2, qCIVG7-2*	9,0-14,2	Vigor de germinación a 14 °C .	Han et al., 2006
5	*qLTG5-4*	24,3	Germinación a 15 °C.	Jiang et al., 2006
5	*qLTG5-2*	32,8	Germinación a 15 °C.	Jiang et al., 2006
3	*qLTG3*	21,6	Germinación a 15 °C.	Jiang et al., 2006
3	*qLTG3-1*	30	Germinación a 15 °C.	Fujino et al., 2008
2	*qLTG2-1*	33,3	Germinación a 15 °C.	Ji et al., 2008
5, 7	*qCTB-5-1/2/3, –7*	-	Germinación a 5 °C.	Lin et al., 2010
3	*qLTB3*	18,1-24,4	Vigor de germinación.	Shirasawa et al., 2012
3	*qLTG3,2*	23	Germinación a 13 y 15 °C.	Satoh et al., 2016
8	*qCGR8*	21,7	Germinación a 13 °C.	Jiang et al., 2017

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Cuadro 3. Genes relacionados con la tolerancia al frío en el cultivo del arroz en la etapa de germinación.

Gen sobreexpresado/promotor	Función del gen	Tratamiento de frío	Características de las plantas transgénicas	Referencia
OsGST/Ubiquitina de maíz.	Detoxificación celular.	Germinación a 13 °C y crecimiento posterior a germinación a 15 °C, durante 13 d.	Disminución en 56 % de los d necesarios para la germinación en las plantas transgénicas, respecto a las plantas sin transformar. El crecimiento de la raíz y el tallo fue mayor en las plantas transgénicas respecto a las plantas no transformadas.	Takesawa et al., 2002

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Efecto de las bajas temperaturas en la etapa de plántula

Durante la etapa de plántula, la temperatura mínima crítica es de 12 a 13 °C (Yoshida, 1981). Tales temperaturas generan cambios fisiológicos en el cultivo (de los Reyes et al., 2003; Aghaee et al., 2011), como disminución del contenido total de clorofila (Aghaee et al., 2011), inhibición de la actividad fotosintética (Allen y Ort, 2001; Díaz et al. 2006; Suzuki et al., 2008) y estrés oxidativo. Esto afecta el vigor, generando poca uniformidad entre las plántulas (da Cruz et al., 2006) y una disminución en el macollamiento (Shimono et al., 2002). Además, puede generar daño irreversible como daño foliar, clorosis y necrosis (Suzuki et al., 2008; Ye et al., 2009; Andaya y Mackill, 2003a). Lo anterior puede provocar un bajo número de plántulas debido a una alta mortalidad (Mackill y Lei, 1997; Andaya y Mackill; 2003a; Baruah et al., 2009) y también una falta madurez del cultivo (Shimono et al., 2004; da Cruz et al., 2006). En climas templados, las bajas temperaturas afectan negativamente el establecimiento de las plántulas, reduciendo la tasa de crecimiento y provocando el amarillamiento de las hojas (Shimono et al., 2002; Ali et al., 2006; Baruah et al., 2009; Alvarado y Hernaíz, 2007). Todos estos efectos pueden inducir una disminución en los rendimientos del cultivo.

Metodologías para la evaluación de la tolerancia al frío en la etapa de plántula

La tolerancia al frío en la etapa de plántula puede ser evaluada desde los 4 °C hasta los 12 °C, examinando, principalmente, el daño visible, supervivencia, peso fresco foliar y, en pocos casos, algunos metabolitos como prolina y malondialdehído (MDA) (Cuadro 4). La mayoría de las evaluaciones se realiza posterior al tratamiento por frío, con un periodo de recuperación que va de 5 a 7 d.

Mapeo de caracteres cuantitavivos (QTLs) relacionados con tolerancia al frío en la etapa de plántula

Los QTLs determinados para la tolerancia al frío en el estado de plántula se muestran resumidamente en el Cuadro 5. Existe una mayor heterogeneidad en las evaluaciones realizadas respecto a las bajas temperaturas utilizadas y a los días de exposición al frío. Las temperaturas varian entre 4 y 10 °C, con 6 a 13 d de exposición, respectivamente. En general, las evaluaciones consideran el crecimiento de la planta o la supervivencia posterior al tratamiento por bajas temperaturas. Se observa que la presencia de QTLs está en la mayoría de los cromosomas.

Evaluación de genes relacionados con la tolerancia al frío en etapa de plántula

Dentro de los genes evaluados, más de la mitad corresponde a genes sobreexpresados de arroz y tres corresponden a genes provenientes de otras especies como *Zea mays*, *Aeluropus littoralis*, *Triticum aestivum*. La sobreexpresión de los genes mencionados en el Cuadro 6 implica un considerable incremento en la tolerancia al frío en la etapa de plántula, mejorando la supervivencia, incrementando en algunos casos la producción de osmolitos compatibles como prolina y, en otros casos, incrementando la tolerancia a otros estreses como el hídrico.

Cuadro 4. Metodologías para la evaluación de la tolerancia al frío en el cultivo del arroz en la etapa de plántula.

Metodología	Referencia
Tasa de supervivencia después de 10 d del tratamiento de frío (10 °C por 3, 6 y 9 d).	Bertin et al., 1996
Porcentaje de sobrevivencia (6 a 10 °C por 7 d).	Qian et al., 2000
Crecimiento y decoloración. Aire frío a 12 ° C día / 10 °C noche, por 10 d, en estado de tres hojas.	Lee, 2001
Escala visual del 1 al 9, posterior a tratamiento de 9 °C por 8, 14, 16 y 18 d.	Andaya y Mackill, 2003b; Andaya y Tai, 2006
Tratamiento de 10 °C día /6 °C noche, por 7 d y 10 d a 25 °C.	Lou et al., 2007
Tratamiento de 12 °C constantes por 10 d.	Han et al., 2007
Tasa de sobrevivencia después de 14 d del tratamiento (4 °C por 6 d en oscuridad).	Koseki et al., 2010
Actividad enzimática (POD, SOD, CAT y APX) (4 °C de 0 a 4 d más recuperación a 25 °C por 7 d).	Bonnecarrère et al., 2011; Huang et al., 2009; Sato et al., 2001
Evaluación del crecimiento de la plántula. 1 = plántula verde oscuro, 3 = plántula verde claro, 5 = plántula amarilla, 7 = plántula café, 9 = plántula muerta. Tratamiento de 9 °C por 14 d.	Kim y Tai, 2011; IRRI, 2002
Cambios en peso fresco de plantas después del tratamiento de frío como indicador de daño por frío (10 °C de 1 a 48 h).	Bonnecarrère et al., 2011
Tasa de supervivencia posterior a tratamiento de frío. Tratamiento a 4 °C por 6 d con recuperación a 26 °C por 6 d.	Zhang et al., 2011
Evaluación de metabolitos: fuga de electrolitos, prolina, MDA, AsA y GSH. Tratamiento de 9 °C por 1 a 14 d.	Tian et al., 2011; Zhang et al., 2011; Kim y Tai, 2011; Yang et al., 2012
Evaluación del daño visible en la hoja. Tratamiento a 10 °C constantes, por 7 d y 7 d de recuperación a 25 °C día/20 °C noche.	Suh et al., 2012
Desarrollo foliar posterior al tratamiento de 4 °C por 7 d, con recuperación a 25 °C por 10 d.	Xie et al., 2012
Tasa de supervivencia de plántula recién germinada con tallo de 5 mm de largo, posterior a tratamiento de frío a 2 °C, con 3 d de recuperación a 20 °C por 7 d.	Zhou et al., 2012
Tratamiento a 14 °C por 2 h seguidas, a 12 °C por 4 h, a 10 °C por 4 h, a 9 °C por 14 h, a 8 °C por 6 h y a 7 °C por 2 h.	Yang et al., 2013
Tratamiento de 4 a 5 °C por 10 d y 7 d de recuperación a 25 °C día/25 °C noche.	Liu et al., 2013
Tratamiento de 9 °C por 9 d, con 7 d de recuperación a 25 °C.	Zhang et al., 2014b
Tratamiento de 15 °C en condiciones de campo.	Verma et al., 2014
18 °C día / 8 °C noche, por 18 d, con 7 d de recuperación a 30 °C día/25 °C noche.	Kim et al., 2014
Evaluación de daño visual a través de escala arbitraria. Tratamiento de 4 °C por 7 d y 5 d de recuperación a 25 °C. Segundo periodo de estrés a 4 °C por 7 d con 5 d de recuperación 25 °C.	Ranawake et al., 2014
Tratamiento de 4 °C por 4 d con 7 d de recuperación a 25 °C día/20 °C noche.	Wang et al., 2016
Tratamiento de 10 °C por 10 d con 7 d de recuperación a 30 °C.	Biswas et al., 2017

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Cuadro 5. Estudio de QTLs relacionados con la tolerancia al frío en la etapa de plántula.

Cromosoma (N°)	Nombre QTL	Varianza fenotípica (%)	Evaluación	Referencias
4	*qCTS4-1*	20,8	Daño foliar, posterior a tratamiento de 9°C por 8 a 18 d.	Andaya y Mackill, 2003a
6	*qCTS6-1*	15,3	Daño foliar, posterior a tratamiento de 9°C por 8 a 18 d.	Andaya y Mackill, 2003a
12	*qCTS12a*	40,6	Daño foliar, posterior a tratamiento de 9°C por 8 a 18 d.	Andaya y Mackill, 2003a
12	*qCTS12b*	41,7	Daño foliar, posterior a tratamiento de 9°C por 8 a 18 d.	Andaya y Mackill, 2003a
11	*qSCT-11*	29,8	Tasa de supervivencia, después de 13 d a 10 °C.	Zhang et al., 2005
3, 5, 8	*qSV-3-1/2, –5, –8-1/2*	3,1-15,8	Crecimiento de la planta.	Zhang et al., 2005
12	*qCTS12*	>40	Daño foliar, posterior a tratamiento de 9 °C constantes por 8 a 14 d.	Andaya y Tai, 2006
4	*qCTS4*	40	Daño foliar, posterior a tratamiento de frío nocturno de 9 °C.	Andaya y Tai, 2007
2	*qCTS-2*	27,4	Tasa de supervivencia, después de 7 d a 6-10 °C.	Lou et al., 2007
1	*qCST-1*	24,5	Tasa de supervivencia, después de 7 d a 6 °C.	Jiang et al., 2008
11	*qCtss11*	40	Tasa de supervivencia, después de 6 d a 4 °C.	Koseki et al., 2010
11	*qCtss11*	40	Crecimiento y daño foliar, posterior a tratamiento de frío a 4 °C por 6 d.	Koseki et al., 2010
2	*qCST2*	20	Sobrevivencia, posterior a tratamiento de 4-5 °C.	Liu et al., 2013
7	*qCTS11(1)-2*	35,6	Daño foliar, posterior a tratamiento a 4 °C.	Ranawake et al., 2014
7	*qCTS7(2)*	35,3	Daño foliar, posterior a tratamiento a 4 °C.	Ranawake et al., 2014
8	*qCTS8(2)*	27,2	Daño foliar, posterior a tratamiento a 4 °C.	Ranawake et al., 2014
11	*qCTS11*	23,1	Daño foliar, posterior a tratamiento con agua fría a 9,1 °C constante.	Zhang et al., 2014b
1	*qSCT1a*	10,6	Tolerancia a la marchitez, posterior a tratamiento de 18 °C día/ 8 °C noche, por 18 d.	Kim et al., 2014
11	*qSCT11*	16,5	Tolerancia a la marchitez, posterior a tratamiento de 18 °C día/ 8 °C noche, por 18 d .	Kim et al., 2014
11	*qCTS11(1)-1*	22,2	Daño foliar, posterior a tratamiento a 4 °C.	Ranawake et al., 2014

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Cuadro 6. Genes relacionados con la tolerancia al frío en el cultivo del arroz en la etapa de plántula.

Gen(es) sobreexpresado(s) / promotor	Función del gen	Tratamiento de frío/fenología	Características de las plantas transgénicas	Efecto negativo presente en las plantas transgénicas	Referencia
OsCDPK7/*CaMV 35S*.	Proteína quinasa dependiente de Ca^{2+}.	4 °C durante 1 d/ plántula de 10 d.	Mejora en la tolerancia al frío, estrés salino e hídrico./ El grado de tolerancia al frío se correlaciona con los niveles de expresión de OsCDPK7. Fluorescencia de las clorofilas recuperadas a niveles cercanos a la normalidad en las plantas transgénicas 48 horas posterior al tratamiento. Además, en las plantas transgénicas se mejoró la inducción de genes de respuesta al estrés en los tratamientos de estrés salino e hídrico.	–	Saijo et al., 2000
OsMAPK5/*CaMV 35S*.	MAP quinasa.	4 °C durante 3 d/ plántula de 14 d.	Incremento en la tolerancia al estrés por frío, sequía e hídrico.	–	Xiong y Yang, 2003
OsDREB1 y *AtDREB1* / *CaMV 35S* y ubiquitina de maíz.	Factores de transcripción.	2 °C durante 4 d/ plántula de 17 d.	Mayor supervivencia (> 90 %) que planta sin transformar posterior a bajas temperaturas, estrés hídrico y salino. Elevado contenido de osmoprotectores como prolina y azúcares solubles.	Crecimiento lento en condiciones normales. Fenotipo enano en estado reproductivo, en algunas líneas transgénicas.	Ito et al., 2006
OsCOIN/Ubiquitina de maíz.	Factor de transcripción.	4 °C durante 3,5 d/ plántula de 14 d.	Incremento de la tolerancia al frío en las plantas transformadas (supervivencia > 79 % en planta transgénica y 52 % en planta sin transformar). Además, se observó un incremento en la tolerancia a estrés salino e hídrico. El contenido de prolina tres veces mayor en plantas transformadas en comparación con las plantas sin transformar.	–	Liu et al., 2007

OsDREB1F/CaMV 35S.	Factor de transcripción.	10°C durante 7 d/ plántula de 16 d.	Mejora la tolerancia a las bajas temperaturas, estrés hídrico y salino.	–	Wang et al., 2008
SNAC2 (Oryza sativa)/ Ubiquitina de maíz.	Factor de transcripción.	4 °C durante 5 d/ plántula de cuatro hojas.	Incremento en la tolerancia al frío tras 7 d de recuperación con más de 50 % en comparación con plantas muertas no transformadas. Además, mejora tolerancia al estrés salino e hídrico. Plantas transgénicas presentaron una menor permeabilidad.	–	Hu et al., 2008
Triticum aestivum TaWFT1 y TaWFT2/CaMV 35S.	Metabolismo de carbohidratos.	5 °C durante 11 d/ plántula de 10 d.	Mejora en la tolerancia al frío con sobre 90 % de supervivencia en comparación con 10 % en las plantas no transformadas. Alta acumulación de fructanos en las plantas transgénicas respecto a las no transformadas.	–	Kawakami et al., 2008
OsZFP245/CaMV 35S.	Factor de transcripción.	4 °C por 4 d/ plántula de tres a cuatro hojas.	Alta tolerancia al frío y estrés hídrico (~ 80 % supervivencia, 20 % en plantas no transformadas). Incremento de prolina y altos niveles de Pirrolina 5 carboxilato sintetasa y genes de transportador de prolina. Incremento en la actividad de enzimas que permiten eliminar especies reactivas derivadas del oxígeno.	Plantas transgénicas sensibilidad a ácido abscísico exógeno.	Huang et al., 2009
OsMYB3R-2/Ubiquitina de maíz.	Factor de transcripción.	2 °C con un máximo de 3,5 d/ plántula de tres hojas.	Mejora la tolerancia estrés frío con 50 % a 20 % de supervivencia en plantas transgénicas a diferencia de las plantas sin transformar que mueren posterior al tratamiento. Se incrementa prolina libre en 1,5 veces respecto a la planta sin transformar. Existe un mayor índice mitótico en las líneas transgénicas respecto a la planta no transformadas.	Crecimiento retardado en condiciones normales en el estado de excersión de panícula. Raíces cortas.	Ma et al., 2009

OsAsr1/Ubiquitina de maíz.	Desconocido	4 °C durante 4 d/ plántula de 10 d.	Mejora en la tolerancia al frío con 32 % de plantas sin marchitez en comparación de las plantas no transformadas con 96 % de plantas marchitas. Eficiencia de la fotosíntesis dos veces mayor que las plantas no transformadas, 1 d después del tratamiento.	–	Kim et al., 2009
OsMYBS3/Ubiquitina de maíz.	Factor de transcripción.	4 °C durante 7 d/ plántula de 10 d.	Incremento en la tolerancia al frío con 86 % de supervivencia de las plantas transgénicas, en comparación con la planta no transformada. Represión de la vía de señalización en condiciones de frío, dependiente del factor de transcripción DREB1/CBF.	En invernadero, las plantas transgénicas presentaron una altura 20 % menor, 30 % menor macollamiento y 1 semana de retraso en la excersión de panícula al compararla con la planta no transformada.	Su et al., 2010
OsPRP3/Ubiquitina de maíz.	Proteína de pared celular.	4 °C durante 4 semanas y evaluación a los 42 d.	Mayor tolerancia al frío en plantas transgénicas en comparación con plantas no transformadas. Incremento en el contenido de prolina (4 veces) con respecto a plantas no transformadas. Células del mesófilo de las plantas transgénicas mantuvieron su estructura y conservaron la integridad de pared celular.	–	Gothandam et al., 2010
OsRAN2/Ubiquitina de maíz.	División celular.	4 °C durante 3 d/ plántula de 14 d.	Incremento en la tolerancia al frío con sobre 80 % de plantas transgénicas vivas en comparación con 14 % en las plantas no transformadas. Las plantas transgénicas mantuvieron la división celular, disminuyeron la proporción de células con tubulina intranuclear y formación normal de envoltura nuclear en el tratamiento de frío.	–	Chen et al., 2011

OsTPS1/*CaMV 35S*.	Metabolismo de carbohidratos.	4 °C durante 5 d/ plántula de 14 d.	Incremento en la tolerancia al frío con 90 % de supervivencia en plantas transgénicas, respecto a 4 % de supervivencia en plantas no transformadas. Incremento de tolerancia a estrés hídrico y salino. Incremento en los niveles de prolina y trealosa.	Leve enanismo y con hojas cortas en plantas crecidas en condiciones normales.	Li et al., 2011
OsOVP1/Ubiquitina de maíz.	Proteína transportadora de H^+.	4 °C durante por 10 d/plántula de 15 d.	Incremento de la tolerancia al frío con 55 % de supervivencia, comparado con 20 % en plantas sin transformar. Incremento en la integridad de la membrana celular. Disminución en el contenido de MDA. Alta acumulación de prolina.	–	Zhang et al., 2011
ZmCBF3/Ubiquitina de maíz.	Factor de transcripción.	4 °C durante 1 d/ plántula de 21 d.	Las líneas transgénicas mostraron un incremento en la tasa de supervivencia (67 % a 93 %) comparada con la planta sin transformar (32 %), posterior al tratamiento de frío. Incremento de tolerancia a estrés hídrico y salino en plantas transgénicas. Menos contenido de MDA y conductividad relativa posterior al estrés.	Crecimiento retardado en etapa de plántula en condiciones normales. El rendimiento no se ve afectado en condiciones de campo.	Xu et al., 2011
OsNAC5/Ubiquitina de maíz.	Factor de transcripción.	4 °C durante 6 d/ plántula de 14 d.	Incremento de la tolerancia al frío con 70 % de supervivencia en comparación con 50 % de la planta no tratada. También presentaron tolerancia al estrés salino e hídrico. Incremento en la acumulación de prolina y azúcares solubles. Reducción en la acumulación de MDA y H_2O_2. Plantas transgénicas mostraron un incremento en liberación de electrolitos solubles en comparación con la planta sin transformar.	–	Song et al., 2011

LeTERF2 (Lycopersicon esculentum)/CaMV35S.	Factor de transcripción.	6 °C durante 3 d/ plántula de 8 d.	Incremento en la tolerancia al frío. Incremento en la acumulación de osmolitos compatibles (prolina y azúcares solubles) y clorofila. Reducción en la presencia de especies reactivas derivadas del oxígeno y MDA posterior al tratamiento de frío. Disminución del índice de fuga de electrolitos posterior al tratamiento.	–	Tian et al., 2011
OsZFP182/CaMV 35S.	Factor de transcripción.	4 °C durante 4 d/ plántula de tres a cuatro hojas.	Alta tasa de supervivencia en líneas transgénicas (~ 80 %) en comparación con las plantas no transformadas (~ 17 %) posterior al tratamiento de frío, estrés salino e hídrico. Acumulación de osmolito compatibles como prolina libre y azúcares solubles.	–	Huang et al., 2012
AlSAP/CaMV 35S.	Factor de transcripción.	4 °C durante 1 d y posteriormente a 12 °C por 3 d/ plántula de seis hojas.	Incremento de la tolerancia al frío con un 100 % de supervivencia posterior a tratamiento de frío. Estrés hídrico y salino. Tasa fotosintética restablecida después de 7 d de recuperación, posterior al tratamiento de frío.	–	Saad et al., 2012
OsMYB2/Ubiquitina de maíz.	Factor de transcripción.	2 °C durante 3 d/ plántula de 14 d.	Mejoramiento de la tolerancia al frío con una supervivencia de 80 % en plantas transgénicas, en comparación con 20 % en el caso de las plantas no transformadas. Además, incrementa tolerancia a la sequía y estrés salino.	–	Yang et al., 2012
COLD1 (*Oryza sativa*).	–	2 a 4 °C por 96 h, con recuperación de 4 d en condiciones controladas/ plántula de tres hojas.	Incremento en la tasa de sobrevivencia (> 80 %) respecto a las plantas sin transformar (< 20 %).	–	Ma et al., 2015

Os09g0410300	Posible función en vía de señales asociadas a los brasinosteroiodes.	8 °C en cámara fría hasta 48 h. Evaluación realizada después de 7 d de recuperación, posterior al tratamiento/ Plántula de tres a cuatro hojas.	Incremento en la supervivencia de las plantas transgénicas (80 %), respecto a las no transformadas, las cuales no sobrevivieron.	–	Zhao et al., 2017

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Efectos de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz en la etapa reproductiva

Durante la etapa reproductiva, las bajas temperaturas afectan negativamente la fertilidad del cultivo, causando una disminución en el rendimiento en grano (da Cruz et al., 2006). Las temperaturas mínimas críticas durante esta etapa del desarrollo son 15 °C (inicio de primordio), 15 a 20 °C (inicio de panícula) y 22 °C (antesis) (Yoshida, 1981). La microsporogénesis es la etapa más sensible al frío en el arroz (Nishiyama, 1995). Temperaturas por debajo de 15 °C, por 2 a 4 noches sucesivas durante la microsporogénesis, pueden causar un alto nivel de esterilidad del polen (Satake 1976; Nishiyama, 1984). Durante esta etapa, la sacarosa se almacena en la antera como almidón y se degrada durante la meiosis. Sin embargo, después del evento de frío se observa una acumulación inusual de almidón en la pared de la antera y se puede estimular la biosíntesis del almidón (Mamun et al., 2010). Durante la etapa microspora, la invertasa de la pared celular específica del arroz es regulada en forma negativa por el frío (Oliver et al., 2005). Algunos estudios han demostrado que, en condiciones de frío, el ácido abscísico (ABA) tendría un papel de regulación negativa de las invertasas de la pared celular del tapete, lo que produce inanición de azúcar en las microsporas en desarrollo, y acumulación anormal de almidón en la antera (Sharma, 2014; Oliver et al., 2005). Éstas y otras anomalías, relacionadas con la alteración bioquímica del metabolismo del azúcar, pueden causar hipertrofia del tapete, degradación de la callosa prematura, baja acumulación de almidón en el grano de polen, vacuolación anormal y formación inusual de la pared del polen y, finalmente, esterilidad del polen (Mamun et al., 2010). El estrés oxidativo también causa el aborto del polen. En el arroz se ha encontrado que la disminución de una proteína responsable de la desintoxicación de ROS (MT-1-4B) en el tapete, induce la esterilidad del grano de polen (De Storme y Geelen, 2014). Las bajas temperaturas también generan la esterilidad del óvulo, lo cual puede ser observado durante la floración como florecillas amorfas de color blanquecino (Arshad et al., 2017). Para la etapa reproductiva, la fertilidad de la espiguilla es el rasgo más común evaluado para determinar la tolerancia al frío, y consiste en calcular la tasa de granos llenos por panícula (Sato et al., 2011). También se ha desarrollado un índice de tolerancia al frío, calculado con base en el peso de los granos llenos por panícula (Cruz, 2010).

Metodologías para la evaluación de la tolerancia al frío en la etapa de reproductiva

Diversas metodologías se han desarrollado para estudiar la etapa reproductiva (Cuadro 7). Las bajas temperaturas utilizadas en las evaluaciones van desde los 5 °C al utilizar aire frío y desde los 19 °C al utilizar tratamiento de agua fría. En el caso del aire frío, los tratamientos no se realizan por más de 5 d, principalmente en la etapa de microspora temprana, los cuales son realizados en cámaras bioclimáticas. En el caso del uso de agua fría, los tratamientos se pueden realizar en condiciones de campo o invernadero, por periodos más largos que van desde inicio de primordio hasta la excersión de la panícula. Estos tratamientos han sido utilizados, principalmente, en la selección de material genético y la búsqueda de QTLs relacionados con la tolerancia al frío en esta etapa del desarrollo del cultivo.

Mapeo de caracteres cuantitavivos (QTLs) relacionados con tolerancia al frío en la etapa reproductiva

En el caso de la etapa reproductiva, los QTLs descritos hasta ahora tienen relación, principalmente, con la cantidad de granos llenos por panícula, largo de la antera y fecha de espigado (Cuadro 8). Las temperaturas utilizadas para las evaluaciones asociadas a estos QTLs fueron 12 °C cuando se utilizó aire frío y 19 °C con agua fría. La duración de la exposición al estrés fue variable, entre 4 d en el caso de aire frío hasta 2 meses en el caso de agua fría.

Evaluación de genes relacionados con la tolerancia al frío en etapa reproductiva

Pocos genes han demostrado efectividad en la tolerancia al frío en la etapa reproductiva (Cuadro 9). Dentro de ellos se han evaluado genes relacionados con el catabolismo de ABA de *Triticum aestivum* y otros dos genes de arroz relacionados con respuestas antioxidantes (*OsAPXa*) e incrementando la actividad de la ATP sintetasa (*CTB4a*).

Cuadro 7. Metodologías para la evaluación de la tolerancia al frío en el cultivo del arroz en la etapa reproductiva.

Metodología	Referencia
Tratamiento de 12 °C en el estado de microspora temprana por 3 a 5 d. Medición del porcentaje de fertilidad.	Koike et al., 1990
Tratamiento de 19 °C con agua fría en condiciones de campo, desde inicio de formación de panícula hasta excersión de panícula en condiciones de luz natural.	Saito et al., 1995
Tratamiento de 19 a 20 °C con agua fría en condiciones de campo, desde inicio de formación de panícula hasta excersión de panícula en condiciones de luz natural.	Li et al., 1997
Tratamiento de 19 °C con agua fría en condiciones de campo e invernadero, desde inicio de formación de panícula hasta excersión de panícula en condiciones de luz natural.	Saito et al., 2001
Tratamiento de 12 °C por 5 d en cámara de crecimiento.	Andaya y Mackill, 2003b
Riego con agua fría a 18 °C con lámina de 25 a 30 cm hasta madurez.	Liu et al., 2003
Tratamiento de 17 °C por 7 d en el estado de antesis. Medición del porcentaje de fertilidad.	da Cruz et al., 2006
Agua fría (20 cm de lámina de agua) a 19 °C desde el estado de primordio hasta excersión de la panícula. Porcentaje de fertilidad.	Kuroki et al., 2007
18 a 21 °C de agua fría en condiciones de campo, desde inicio de formación de panícula hasta excersión de panícula en condiciones de luz natural.	Xu et al., 2008
Tratamiento de 19,4 °C con agua fría en condiciones de campo al estado de inicio de panícula hasta excersión de panícula en condiciones de luz natural.	Kuroki et al., 2009
Tratamiento de 21 a 15 °C en condiciones de luz natural por 15 d a estado de bota.	Ye et al., 2010
Fertilidad de la panícula posterior a tratamiento a 12 °C por 6 d durante el estado de bota.	Sato et al., 2011

Tratamiento de 17 a 20 °C desde macollamiento hasta maduración.	Jiang et al., 2011
Tratamiento a 17 °C en el estado de bota por 10 d. Evaluación del porcentaje de fertilidad.	Suh et al., 2010; Jena et al., 2012
Esterilidad floral posterior a tratamiento con agua fría entre 18 y 19 °C con 20 a 25 cm de lámina de agua desde inicio de formación de panícula, hasta excersión de panícula (~ 60 d).	Shirasawa et al., 2012
Tratamiento de 17,5 °C día/noche con 50 % de sombra en condiciones de luz natural.	Shinada et al., 2013

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Cuadro 8. Estudio de QTLs relacionados con la tolerancia al frío en la etapa reproductiva.

Cromosoma (N°)	Nombre del QTL	Varianza fenotípica (%)	Método de evaluación	Referencias
1	*Ste1*	32,1	Fertilidad de la antera.	Li et al., 1997
1	*Ste2*	19,4	Fertilidad de la antera.	Li et al., 1997
12	*Ste3*	16,9	Fertilidad de la antera.	Li et al., 1997
7	*qCT-7*	22,1	Fertilidad de la antera.	Takeuchi et al., 2001
1	*qCL-1*	31,1	Largo de la antera.	Takeuchi et al., 2001
3	*qHD-3-2*	15,5	Días a espigado.	Takeuchi et al., 2001
4	*Ctb1, Ctb2*	–	Fertilidad de la panícula.	Saito et al., 2001
6	*qHD-6*	50,5	Días a espigado.	Takeuchi et al., 2001
2	*qCTB2a*	16,8	Fertilidad de la panícula.	Andaya y Mackill, 2003a
3	*qCTB3*	16,5	Fertilidad de la panícula.	Andaya y Mackill, 2003a
2, 3	*qCTB2a, qCTB3*	–	Fertilidad de la panícula.	Andaya y Mackill, 2003b
7	*qRCT7*	20,6	Fertilidad de la panícula.	Dai et al., 2004
1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11	*Dth (3, 6 y 7), cl (1 y 9), fer (11), pe (1 y11)* y *dc (5 y 11)*	11,5 - 39,3	Días para que ocurra el espigado, largo del tallo, fertilidad de la panícula, excersión de la panícula, decoloración.	Oh et al., 2004
8	*qCTB8*	26,6	Fertilidad de la semilla.	Kuroki et al., 2007
10	*qCTB-10-2*	15,0	Fertilidad de la panícula.	Xu et al., 2008
1, 4, 5, 10, 11	*qCTB-1-1, qCTB–4-1, qCTB–5-1, qCTB–5-2* y *qCTB–10-1*	0,9 - 14,9	Fertilidad de la panícula.	Xu et al., 2008
1	*qCTF1*	29,5	Fertilidad de la panícula.	Kuroki et al., 2009

10	*qCTF10-2*	20,4	Fertilidad de la panícula.	Kuroki et al., 2009
10	*qCTF10-1*	35,4	Fertilidad de la panícula.	Kuroki et al., 2009
3, 7, 8, 9, 11	*qPSST-3, qPSST–7, qPSST –9*	27,4	Fertilidad de la panícula.	Suh et al., 2010
4	*Ctb1*	–	Fertilidad de la panícula.	Saito et al., 2010
10	*qLTSPKST10.1*	20,5	Fertilidad de la panícula.	Ye et al., 2010
7	*qCTB7*	21,0	13 atributos relacionados con tolerancia al frío en etapa reproductiva.	Zhou et al., 2010
2	*QTL 2.1*	16,7	Fertilidad de la panícula.	Jiang et al., 2011
8	*QTL 8.1*	24,8	Fertilidad de la panícula.	Jiang et al., 2011
10	*QTL 10.1*	22,9	Fertilidad de la panícula.	Jiang et al., 2011
3	*qLTB3*	24,4	Fertilidad de la panícula.	Shirasawa et al., 2012
7	*qCC1-7-1*	39,8	Evaluación de clorofila de hoja bandera.	Yang et al., 2018

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Cuadro 9. Genes relacionados con la tolerancia al frío en el cultivo del arroz en la etapa reproductiva.

Gen sobrexpresado/ promotor	Función del gen	Tratamiento de frío/ fenología	Características de las plantas transgénicas	Efecto negativo presente en las plantas transgénicas	Referencia
TaABA8′OH1/ OsG6B.	Catabolismo de ABA.	12 °C durante 5 d/etapa reproductiva.	Porcentaje de esterilidad se redujo en las plantas transgénicas (30 % - 63 %) en comparación con las plantas no tratadas. Acumulación de ABA en la florecilla se redujo en las plantas transgénicas estresadas por las bajas temperaturas.	–	Ji et al., 2011

OsAPXa/E0082b.	Enzima antioxidante.	12 °C durante 6 d/etapa de bota.	Fertilidad de la espiguilla fue significativamente mayor en las plantas transgénicas, respecto a las plantas no transformadas. Niveles de peróxido de hidrógeno y contenido de MDA más bajos que las plantas no transformadas. Actividad de la enzima ascorbato peroxidasa tuvo una correlación negativa respecto a los niveles de MDA y peróxido de hidrógeno.	–	Sato et al., 2011
CTB4a/CAMV35S.	Receptor tipo kinasa con motivo repetido rico en leucina.	Tratamiento de frío con agua fría de 16 °C a 18 °C/etapa de bota.	Tolerancia a frío en etapa de bota.	–	Zhang et al., 2017

Adaptado de Da Cruz et al., 2013; Zhang et al., 2014a; Biswas et al., 2019.

Mecanismos de señalización y regulación molecular de las bajas temperaturas en la planta de arroz

Para sobrevivir a bajas temperaturas, las plantas de arroz perciben el fenómeno y lo transmiten mediante señales que activan mecanismos de tolerancia al estrés por frío. Dentro de los mecanismos de defensa frente a este estrés está la reprogramación de la transcripción, generándose cambios en el crecimiento y desarrollo que afectan el ciclo de vida normal de la planta. Según lo que se conoce hasta ahora, las bajas temperaturas inducen un cambio físico, disminuyendo la fluidez de la membrana plasmática (Monroy y Dhindsa, 1995; Zhu, 2016) (Figura 1A) y generando cambios en la organización del citoesqueleto. Estos fenómenos gatillan la activación de proteínas de membrana que a su vez activan canales de Ca^{2+}. Por ejemplo, se cree que el complejo proteico, que se conoce como COLD1/RCA1 y que corresponde a una proteína de membrana que interactua con una proteína G, se activaría a través de los cambios físicos de la membrana plasmática, induciendo la activación de la proteína RCA1 que a su vez activaría canales de calcio. Estos canales se denominan CNGCs (canales regulados por nucleótidos cíclicos) y están ubicados en la membrana plasmática (Zelman et al., 2012). En arroz estos canales (OsCNGCs) están clasificados en 4 grupos (I-IV) con dos subgrupos (IVA y IVB) (Nawaz et al., 2014). En condiciones de bajas temperaturas se incrementa la expresión de los grupos I al III, mientras que en el caso del grupo IV, se reprime (Guo et al., 2018).

El calcio presente en alta concentración en el apoplasto entra en la célula, activando proteínas sensibles a calcio como la enzima calmodulina (OsCAM) o similares a la calmodulina (CML), proteína similar a la calcineurina B (OsCBL) y proteína kinasa dependiente de calcio (OsCDPK). En

el caso de las proteínas CBL, pueden interactuar con proteínas quinasa CIPKs. Estas proteínas inducen factores de transcripción relacionados con la tolerancia al frío (OsMYB2, OsMYB3R, OsICE1/2, OsMYBS3), iniciándose una respuesta relacionada con la expresión de genes a través de los factores de transcripción DREB2A y DREB1B, que confieren tolerancia a las bajas temperaturas.

Las bajas temperaturas inducen, además, el incremento de la concentración citoplasmática de la hormona ABA (Figura 1B). Esta hormona actúa a nivel nuclear, gatillando indirectamente la expresión de genes como *OsNAC*, que es un factor de transcripción que activa la expresión de genes relacionados con la tolerancia al frío en arroz.

Las bajas temperaturas pueden causar el aumento de las ROS en los tejidos de las plantas. En estas condiciones las ROS pueden dañar el ADN, las membranas lipídicas y las proteínas (Mittler, 2002; Apel y Hirt, 2004). Además, el estrés oxidativo induce alteraciones en el estado redox de las proteínas que regulan las funciones de las proteínas y la degradación (Moller et al., 2007). Las plantas han desarrollado numerosos mecanismos para reducir los efectos del daño oxidativo. Algunos de ellos están asociados con sistemas enzimáticos captadores de las ROS, por ejemplo, superóxido dismutasa, catalasa y ascorbato peroxidasa (Ahmad et al., 2010). El estrés oxidativo causado por ROS se produce debido a un desequilibrio entre la formación de especies oxidativas y las defensas antioxidantes de la célula. En consecuencia, los niveles de ROS en la célula aumentan rápidamente (Tsugane et al., 1999). Las ROS se producen en las cadenas de transporte de electrones de cloroplastos y mitocondrias, algunas peroxidasas y oxidasas y moléculas de clorofila excitadas (Cheeseman, 2007). En la cadena de transporte de electrones mitocondrial, la NAD deshidrogenasa y citocromo reductasa generan aniones superóxido ($O_2^{\bullet-}$) que se reducen a peróxido de hidrógeno (H_2O_2). El H_2O_2 puede reaccionar con Fe^{2+} y Cu^{+} reducidos para producir los radicales hidroxilo ($^{\bullet}HO$) (Sweetlove y Foyer, 2004). En los cloroplastos, las ROS se generan por una reducción de oxígeno univalente en la reacción de Mehler en la cadena de transporte de electrones (Asada, 1996; Edreva, 2005). El $O_2^{\bullet-}$ generado también puede ser transformado a radical perhidroxilo ($HO_2^{\bullet}$), iniciando la peroxidación lipídica. La transformación de $O_2^{\bullet-}$ en H_2O_2 y O_2 en la superficie de la membrana del estroma externo puede ocurrir espontáneamente o mediante la enzima superóxido dismutasa (SOD) (Grant y Loake, 2000). A través de la reacción de Fenton, el H_2O_2 se transforma en $^{\bullet}HO$, la especie más reactiva. Para evitar la producción de $^{\bullet}HO$, el H_2O_2 es eliminado por la maquinaria antioxidante (Dat et al., 2000). Otras fuentes de las ROS están relacionadas con la clorofila excitada, que induce la producción de $O_2^{\bullet-}$ y oxígeno singlete ($^1O_2$) (Asada, 1996).

En condiciones de bajas temperaturas, las ROS inducen una respuesta basada en la fosforilación en cadena de proteínas quinasa, a partir de la enzima OsMKK6 (Figura 1C), la que fosforila a la enzima OsMAPK3. Esta última entra en el núcleo celular, fosforilando factores de transcripción como OsICE1, que a su vez induce la expresión de genes de respuesta al frío como OsTTP1, el cual está encargado de la producción de trealosa.

Finalmente, algunos estudios han demostrado que micro ARNs también tendrían efecto en la tolerancia al frío, como ocurre con el miR319 en el arroz (Figura 1D). Este micro ARN induce un incremento de los niveles de prolina, expresión de genes relacionados con la tolerancia al frío e inhibición de la expresión de proteínas como TCP1 y OsPCF6.

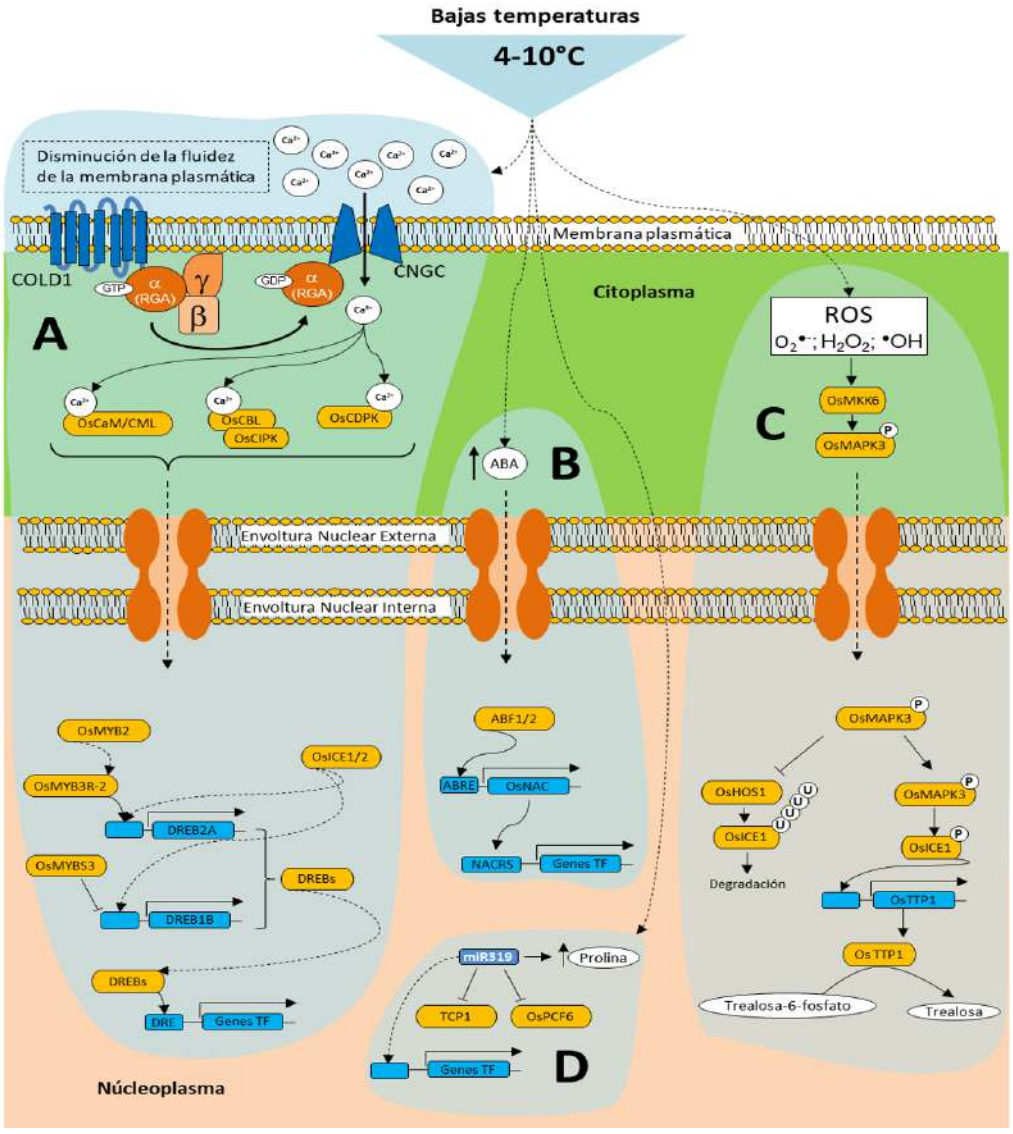


Figura 1. Esquema propuesto de la percepción y mecanismos de respuesta frente a las bajas temperaturas. El esquema representa una propuesta para los mecanismos moleculares relacionados con los principales procesos de percepción y respuesta a las bajas temperaturas en el arroz, encontrados hasta la fecha. A) Mecanismo de respuesta a las bajas temperaturas dependiente de calcio; B) mecanismo de respuesta a las bajas temperaturas dependiente de ácido abscísico (ABA); C) mecanismo de respuesta a las bajas temperaturas dependiente de especies reactivas derivadas del oxígeno (ROS); D) mecanismo de respuesta a las bajas temperaturas dependiente de micro ARN (miR319). CNGC: canal de calcio activado por nucleótidos cíclicos, ubicado en la membrana plasmática; P: fosfato; COLD 1: regulador de proteína G ubicado en membrana plasmática; RGA1: subunidad 1 de proteína G de arroz. En color naranja (■) se representan las proteínas relacionadas con la respuesta a las bajas temperaturas. En color azul (■) se presentan los segmentos de ADN nuclear que tienen relación con la respuesta a las bajas temperaturas. Genes TF: genes relacionados con la tolerancia al frío. El diagrama corresponde al resumen de diagramas revisados en la literatura (Zhang et al., 2013; 2014a; Ma et al., 2015; Guo et al., 2018).

Referencias

Aghaee, A., Moradi, F., Zare-Maivan, H., et al. 2011. Physiological responses of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to chilling stress at seedling stage. Afr. J. Biotechnol. 10:7617-7621.

Ahmad, P., Jaleel, C.A., Salem, M.A., et al. 2010. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. Crit. Rev. Biotechnol. 30:161–175.

Ali, M.G., Naylor, R.E.L., Matthews, S. 2006. Distinguishing the effects of genotype and seed physiological age on low temperature tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) Exp. Agric. 42:337-349.

Allen, D.J., Ort, D.R. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. Trends Plant Sci. 6:36-42.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2007. Antecedentes generales sobre el arroz en Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), INIA Quilamapu, Chillán, Chile.

Andaya, V.C., Mackill, D.J. 2003a. Mapping of QTLs associated with cold tolerance during the vegetative stage in rice. J. Exp. Bot. 54:2579-2585

Andaya, V.C., Mackill, D.J. 2003b. QTLs conferring cold tolerance at the booting stage of rice using recombinant inbred lines from a *japonica* x *indica* cross. Theor. Appl. Genet. 106:1084-1090.

Andaya, V.C., Tai, T.H. 2006. Fine mapping of the *qCTS12* locus, a major QTL for seedling cold tolerance in rice. Theor. Appl. Genet. 113:467-475.

Andaya, V, Tai, T. 2007. Fine mapping of the qCTS4 locus associated with seedling cold tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) Mol. Breed. 20:349-358.

Apel, K., Hirt, H. 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. Annu. Rev. Plant Biol. 55:373-399.

Arshad, M.S., Farooq, M., Asch, F., et al. 2017. Thermal stress impacts reproductive development and grain yield in rice. Plant Physiol. Biochem. 115:57-72.

Asada, K. 1996. Radical production and scavenging in the chloroplasts. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Bailly, C. 2004. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. Seed Sci. Res. 14:93-107.

Baruah, A.R., Ishigo-Oka, N., Adachi, M., et al. 2009. Cold tolerance at the early growth stage in wild and cultivated rice. Euphytica 165:459-470.

Bertin, P., Kinet, J.M., Bouharmont, J. 1996. Evaluation of chilling sensitivity in different rice varieties. Relationship between screening procedures applied during germination and vegetative growth. Euphytica 89:201-210.

Biswas, P.S., Khatun H., Das, N., et al. 2017. Mapping and validation of QTLs for cold tolerance at seedling stage in rice from an *indica* cultivar Habiganj Boro VI (Hbj.BVI). 3 Biotech. 7:359.

Biswas, P.S., Rashid, M.M., Khatun, H., et al. 2019. Scope and progress of rice research harnessing cold tolerance. p. 225-264. In Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Nahar, K., et al. (eds.) Advances in rice research for abiotic stress tolerance. Elsevier Science Publishing, New York, USA.

Bonnecarrère, V., Borsani, O., Díaz, P., et al. 2011. Response to photoxidative stress induced by cold in japonica rice is genotype dependent. Plant Sci. 180:726-732.

Cantrell, R.P., Reeves, T.G. 2002. The rice genome: The cereal of the world's poor takes center stage. Science 296(5565):53.

Cheeseman, J. 2007. Hydrogen peroxide and plant stress: a challenging relationship. Plant Stress 1:4-15.

Chen, L., Lou, Q., Sun, Z., et al. 2006. QTL mapping of low temperature on germination rate of rice. Rice Sci. 13:93-98.

Chen, N.A., Xu, Y., Wang, X., et al. 2011. OsRAN2, essential for mitosis, enhances cold tolerance in rice by promoting export of intranuclear tubulin and maintaining cell division under cold stress. Plant Cell Environ. 34:52-64.

Cruz, M. 2010. Tolerancia del arroz a la temperatura baja. p.180-190. En Degiovanni, V., Martínez, C., Motta, F. (eds.) Producción Eco-Eficiente del Arroz en América Latina. Publicación CIAT N° 365. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

da Cruz, R., Milach, S.C., Federizzi, L.C. 2006. Rice cold tolerance at the reproductive stage in a controlled environment. Sci. Agric. 63:255-261.

da Cruz, R.P., Sperotto, R.A., Cargnelutti, D., et al. 2013. Avoiding damage and achieving cold tolerance in rice plants. Food Energy Secur. 2:96-119.

Dai, L., Lin, X., Ye, C., et al. 2004. Identification of quantitative trait loci controlling cold tolerance at the reproductive stage in Yunnan landrace of rice, Kunmingxiaobaigu. Breed. Sci. 54:253-258.

Dat, J., Vandenabeele, S., Vranová, E., et al. 2000. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. Cell. Mol. Life Sci. 57:779-795.

de los Reyes, B.G., Morsy, M., Gibbons, J., et al. 2003. A snapshot of the low temperature stress transcriptome of developing rice seedling (*Oryza sativa* L.) via ESTs from subtracted cDNA library. Theor. Appl. Genet. 107:1071-1082.

De Storme, N., Geelen, D. 2014. The impact of environmental stress on male reproductive development in plants: biological processes and molecular mechanisms. Plant Cell Environ. 37:1-18.

Díaz, S., Morejón, R., Castro, R., et al. 2006. Comportamiento de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) seleccionados para tolerancia a bajas temperaturas en siembra temprana de frío. Cult. Trop. 27:71-75.

Donoso, G., Cabas, P., Paredes, M., et al. 2015. Cold tolerance evaluation of temperate rice (*Oryza sativa* L. ssp. japonica) genotypes at the seedling stage. Gayana Botánica. 72: 1-13.

Donoso, G., Leyton, M., Paredes, M., et al. 2014. Relative expression of genes related with cold tolerance in temperate rice at the seedling stage. African J. Biotech. 13: 2506-2512.

Donoso, G., Paredes, M., Arbiza O., et al. 2013. Cold tolerance evaluation in Chilean rice genotypes at the germination stage. Chil. J. Agric. Res. 73:3-8.

Edreva, A. 2005. Generation and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts: a submolecular approach. Agric. Ecosyst. Environ. 106:119-133.

El-Maarouf-Bouteau, H., Bailly, C. 2008. Oxidative signaling in seed germination and dormancy. Plant Signal. Behav. 3:175-182.

Fujino, K., Sekiguchi, H., Matsuda, Y., et al. 2008. Molecular identification of a major quantitative trait locus, qLTG3-1, controlling low-temperature germinability in rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105:12623-12628.

Fujino, K., Sekiguchi, H., Sato, T., et al. 2004. Mapping of quantitative trait loci controlling low-temperature germinability in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 108:794-799.

Gothandam, K.M., Nalini, E., Karthikeyan, S., et al. 2010. OsPRP3, a flower specific proline-rich protein of rice, determines extracellular matrix structure of floral organs and its overexpression confers cold-tolerance. Plant Mol. Biol. 72:125-135.

Grant, J.J., Loake, G.J. 2000. Role of reactive oxygen intermediates and cognate redox signaling in disease resistance. Plant Physiol. 124:21-30.

Guo, X., Liu, D., Chong, K. 2018. Cold signaling in plants: Insights into mechanisms and regulation. J. Integr. Plant Biol. 60:745-756.

Han, L.Z., Qiao, Y.L., Zhang, S.Y., et al. 2007. Identification of quantitative trait loci for cold response of seedling vigor traits in rice. J. Genet. Genom. 34:239-246.

Han, L.Z., Zhang, Y.Y., Qiao, Y.L., et al. 2006. Genetic and QTL analysis for low-temperature vigor of germination in rice. Acta Genet. Sin. 33:998-1006.

He, D., Han, C., Yao, J., et al. 2011. Constructing the metabolic and regulatory pathways in germinating rice seeds through proteomic approach. Proteomics 1113:2693-2713.

He, D., Yang, P. 2013. Proteomics of rice seed germination. Front. Plant Sci. 4:246.

Hou, M.Y., Jiang, L., Wang, C.M., et al. 2003. Detection and analysis of QTLs for low temperature germinability in rice (*Oryza sativa* L.) Rice Genet. Newslett. 20:52-55.

Howarth, C.J., Ougham, H.J. 1993. Gene expression under temperature stress. New Phytol. 125:1-26.

Hu, H., You, J., Fang, Y., et al. 2008. Characterization of transcription factor gene *SNAC2* conferring cold and salt tolerance in rice. Plant Mol. Biol. 67:169-181.

Huang, J., Sun, S., Xu, D., et al. 2009. Increased tolerance of rice to cold, drought and oxidative stresses mediated by the overexpression of a gene that encodes the zinc finger protein ZFP245. Biochem. Biophys. Res. Commun. 389:556-561.

Huang, J., Sun, S., Xu, D., et al. 2012. A TFIIIA-type zinc finger protein confers multiple abiotic stress tolerances in transgenic rice (*Oryza sativa* L.) Plant Mol. Biol. 80:337-350.

Hyun, U.J., Yeo, S.M., Lee, S.B., et al. 2016. Optimization of temperature regime to screen cold tolerant rice seedlings. Plant Breed. Biotech. 4:176-187.

IRRI. 2002. Standard evaluation system for rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippine.

Ito, Y., Katsura, K., Maruyama, K., et al. 2006. Functional analysis of rice DREB1/CBF-type transcription factors involved in cold-responsive gene expression in transgenic rice. Plant Cell Physiol. 47:141-153.

Jena, K.K., Hardy, B. 2012. "Foreword" (p.v). In Jena, K.K., Hardy, B. (eds.) Advances in temperate rice research. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.

Jena, K., Kim, S.M., Suh, J.P., et al. 2012. Identification of cold-tolerant breeding lines by quantitative trait loci associated with cold tolerance in rice. Crop Sci. 52:517-523.

Ji, X., B., Dong, B., Shiran, M.J., et al. 2011. Control of abscisic acid catabolism and abscisic acid homeostasis is important for reproductive stage stress tolerance in cereals. Plant Physiol. 156:647–662.

Ji, S.L., Jiang, L., Wang, Y.H., et al. 2008. QTL and epistasis for low temperature germinability in rice. Acta Agron. Sin. 34:551-556.

Jiang, W., Jin, Y.M., Lee, J., et al. 2011. Quantitative trait loci for cold tolerance of rice recombinant inbred lines in low temperature environments. Mol. Cells 32:579-587.

Jiang, L., Liu, S., Hou, M., et al. 2006. Analysis of QTLs for seed low temperature germinability and anoxia germinability in rice (*Oryza sativa* L.) Field Crop Res. 98:68-75.

Jiang, N., Shi, S., Shi, H., et al. 2017. Mapping QTL for seed germinability under low temperature using a new high-density genetic map of rice. Front. Plant Sci. 8:1223.

Jiang, L., Xun, M., Wang, J., et al. 2008. QTL analysis of cold tolerance at seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.) using recombination inbred lines. J. Cereal Sci. 48:173-179.

Kawakami, A., Sato, Y., Yoshida, M. 2008. Genetic engineering of rice capable of synthesizing fructans and enhancing chilling tolerance. J. Exp. Bot. 59:793-802.

Khush, G.S. 1997. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. Plant Mol. Biol. 35:25-34.

Kim, S.J., Lee, S.C., Hong, S.K., et al. 2009. Ectopic expression of a cold-responsive *OsAsr1* cDNA gives enhanced cold tolerance in transgenic rice plants. Mol. Cells. 27:449–458.

Kim, S.M., Suh, J.P., Lee, C.K., et al. 2014. QTL mapping and development of candidate gene-derived DNA markers associated with seedling cold tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) Mol. Genet. Genom. 289:333-343.

Kim, S.I., Tai, T.H. 2011 Evaluation of seedling cold tolerance in rice cultivars: a comparison of visual ratings and quantitative indicators of physiological changes. Euphytica. 178:437–447.

Koike, S., Takeda, K., Satake, T. 1990. Comparison of cold tolerance between isogenic pairs differing in grain size. Rice Genet. Newslett. 7:133134.

Koseki, M., Kitazawa, N., Yonebayashi, S., et al. 2010. Identification and fine mapping of a major quantitative trait locus originating from wild rice, controlling cold tolerance at the seedling stage. Mol. Genet. Genom. 284:45-54.

Kuroki, M., Saito, K., Matsuba, S., et al. 2007. A quantitative trait locus for cold tolerance at the booting stage on rice chromosome 8. Theor. Appl. Genet. 115:593-600.

Kuroki, M., Saito K., Matsuba, S., et al. 2009. Quantitative trait locus analysis for cold tolerance at the booting stage in a rice cultivar, Hatsushizuku. Jpn. Agric. Res. Quart. 43:115-121.

Lee, M.H. 2001. Low temperature tolerance in rice: the Korean experience. p. 109–117. In Fukai, S., Basnayake, J. (eds.) Increased lowland rice production in the Mekong Region. Proceedings of an International Workshop, Vientiane, Laos. 30 October-2 November 2000. Australian Center for International Agricultural Research, Canberra, Australia.

Li, L., Liu, X., Xie, K., et al. 2013. qLTG-9, a stable quantitative trait locus for low temperature germination in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 126:2313-2322.

Li, H.B., Wang, J., Liu, A.M., et al. 1997. Genetic basis of low-temperature-sensitive sterility in *indica-japonica* hybrids of rice as determined by RFLP analysis. Theor. Appl. Genet. 95:1092-1097.

Li, H.W., Zang, B.S., Deng, X.W., et al. 2011. Overexpression of the trehalose-6-phosphate synthase gene OsTPS1 enhances abiotic stress tolerance in rice. Planta 234:1007-1018.

Lin, J., Zhu, W., Zhang, Y., et al. 2010. Detection of quantitative trait loci for cold tolerance at the bud bursting stage by using chromosome segment substitution lines in rice (*Oryza sativa*). Chin. J. Rice Sci. 24:233-236.

Liu, F., Sun, C., Tan, L., et al. 2003. Identification and mapping of quantitative trait loci controlling cold tolerance of Chinese common wild rice (*O. rufipogon* Griff.) at booting to flowering stages. Chin. Sci. Bull. 48:2068-2071.

Liu, K., Wang, L., Xu, Y., et al. 2007. Overexpression of OsCOIN, a putative cold inducible zinc finger protein, increased tolerance to chilling, salt and drought, and enhanced proline level in rice. Planta 226:1007-1016.

Liu, F., Xu, W., Song, Q., et al. 2013. Microarray-assisted fine-mapping of quantitative trait loci for cold tolerance in rice. Mol. Plant. 6:757–767.

Lou, Q., Chen, L., Sun, Z., et al. 2007. A major QTL associated with cold tolerance at seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.) Euphytica 158:87-94.

Ma, Q., Dai, X., Xu, Y., et al. 2009. Enhanced tolerance to chilling stress in *OsMYB3R-2* transgenic rice is mediated by alteration in cell cycle and ectopic expression of stress genes. Plant Physiol. 150:244-256.

Ma, Y., Dai, X., Xu, Y., et al. 2015. COLD1 confers chilling tolerance in rice. Cell 160:1209-1221.

Mackill, D.J., Lei, X. 1997. Genetic variation for traits related to temperate adaptation of rice cultivars. Crop Sci. 37:1340-1346.

Mamun, E., Cantrill, L.C., Overall, R.L., et al. 2010. Mechanism of low-temperature-induced pollen failure in rice. Cell Biol. Int. 34:469-476.

Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends Plant Sci. 7:405-410.

Miura, K., Lin, S.Y., Yano, M., et al. 2001. Mapping quantitative trait loci controlling low temperature germinability in rice (*Oryza sativa* L.) Breed. Sci. 51:293-299.

Moller, I.M., Jensen, P.E., Hansson, A. 2007. Oxidative modifications to cellular components in plants. Annu. Rev. Plant Biol. 58:459-481.

Monroy, A.F., Dhindsa, R.S. 1995. Low-temperature signal transduction: induction of cold acclimation-specific genes of alfalfa by calcium at 25°C. Plant Cell 7:321-331.

Nawaz, Z., Kakar, K.U., Saand, M.A., et al. 2014. Cyclic nucleotide-gated ion channel gene family in rice, identification, characterization and experimental analysis of expression response to plant hormones, biotic and abiotic stresses. BMC Genomics 15:18.

Nishiyama, I. 1984. Climatic influence on pollen formation and fertilization. p. 153-171. Shigesaburo, T., Takahashi, N. (eds.) Developments in crop science: Biology of rice. Japan Scientific Societies Press, Tokyo, Japan.

Nishiyama, I. 1995. Physiological basis of the damage caused by unfavorable climatic conditions, diseases, and insect pests. p. 769-793. In Matsuo, T., Kumazawa, K., Ishii, R., et al. (eds.) Science of the rice plant. Food and Agriculture Policy Research Center, Tokyo, Japan.

Oh, C.S., Choi, Y.H., Lee, S.J., et al. 2004. Mapping of quantitative trait loci for cold tolerance in weedy rice. Breed. Sci. 54:373-380.

Oliver, S.N., van Dongen, J.T., Alfred, S.C., et al. 2005. Cold-induced repression of the rice anther-specific cell wall invertase gene osinv4 is correlated with sucrose accumulation and pollen sterility. Plant Cell Environ. 28:1534-1551.

Pradedova, E.V., Isheeva, O.D., Salyaev, R.K. 2011. Classification of the antioxidant defense system as the ground for reasonable organization of experimental studies of the oxidative stress in plants. Russ. J. Plant Physiol. 58:210-217.

Qian, Q., Zeng, D., He, P., et al. 2000. QTL analysis of the rice seedling cold tolerance in a double haploid population derived from anther culture of a hybrid between *indica* and *japonica* rice. Chin. Sci. Bull. 45:448-453.

Ranawake, A.L., Manangkil, O.E., Yoshida, S., et al. 2014. Mapping QTLs for cold tolerance at germination and the early seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.) Biotechnol. Biotechnol. Equip. 28:989-998.

Rashid, M., Yasmeen, R. 2018. Cold injury and flash flood damage in boro rice cultivation in Bangladesh: A review. Bangladesh Rice J. 21:13-25.

Reinke, R., Beecher, G., Dunn, B., et al. 2012. Temperate rice in Australia. p. 1–14. In Jena, K.K., Hardy, B. (eds.) Advances in temperate rice research. International Rice Research Institute: Los Baños, Philippines.

Rinalducci, S., Murgiano, L., Zolla, L. 2008. Redox proteomics: basic principles and future perspectives for the detection of protein oxidation in plants. J. Exp. Bot. 59:3781-3801.

Saad, B.R., Fabre, D., Mieulet, D., et al. 2012. Expression of the Aeluropus littoralis AlSAP gene in rice confers broad tolerance to abiotic stresses through maintenance of photosynthesis. Plant Cell Environ. 35:626-643.

Saijo, Y., Hata, S., Kyozuka, J., et al. 2000. Over-expression of a single Ca^{2+}-dependent protein kinase confers both cold and salt/drought tolerance on rice plants. Plant J. 23:319-327.

Saito, K., Miura, K., Nagano, K., et al. 1995. Chromosomal location of quantitative trait loci for cold tolerance at the booting stage in rice variety "Norin-PL8". Jpn. J. Breed. 45:337-340.

Saito, K., Miura, K. Nagano, K., et al. 2001. Identification of two closely linked quantitative trait loci for cold tolerance on chromosome 4 of rice and their association with anther length. Theor. Appl. Genet. 103:862-868.

Saito, K., Saito, Y.H., Funatsuki, W.M., et al. 2004. Physical mapping and putative candidate gene identification of a quantitative trait locus *Ctb1* for cold tolerance at the booting stage of rice. Theor. Appl. Genet. 109:515-522.

Saito, K., Saito, Y.H. Kuroki, M., et al. 2010. Map-based cloning of the rice cold tolerance gene *Ctb1*. Plant Sci. 179:97-102.

Sanghera, G.S., Wani, S.H., Hussain, W., et al. 2011. Engineering cold stress tolerance in crop plants. Curr. Genom. 12:30-43.

Satake, T. 1976. Determination of the most sensitive stage to steriletype cool injury in rice plants. Res. Bull. Hokkaido Natl. Agric. Exp. Stn. 113:1-43.

Sato, Y., Masuta, Y., Saito, K., et al. 2011. Enhanced chilling tolerance at the booting stage in rice by transgenic overexpression of the ascorbate peroxidase gene, OsAPXa. Plant Cell Rep. 30:399-406.

Sato, Y., Murakami, T., Funatsuki, H., et al. 2001. Heat shock-mediated APX gene expression and protection against chilling injury in rice seedlings. J. Exp. Bot. 52:145-151.

Satoh, T., Tezuka, K., Kawamoto, T., et al. 2016. Identification of QTLs controlling low-temperature germination of the East European rice (*Oryza sativa* L.) variety Maratteli. Euphytica 207 245-254.

Sharma, K.D. 2014. Pollen development under cold stress: A molecular perspective. Austin J. Genet. Genom. Res. 1:4.

Shimono, H., Hasegawa, T., Fujimura, S., et al. 2004. Responses of leaf photosynthesis and plant water status in rice to low water temperature at different growth stages. Field Crops Res. 89:71-83.

Shimono, H., Hasegawa, T., Iwama, K. 2002. Response of growth and grain yield in paddy rice to cool water at different growth stages. Field Crops Res. 73:67-79.

Shinada, H., Iwata, N., Sato, T., et al. 2013. Genetical and morphological characterization of cold tolerance at fertilization stage in rice. Breed. Sci 63:197-204.

Shirasawa, S., Endo, T., Nakagomi, K., et al. 2012. Delimitation of a QTL region controlling cold tolerance at booting stage of a cultivar, 'Lijiangxintuanheigu', in rice, *Oryza sativa* L. Theor. Appl. Genet. 124(5):937-946.

Song, S.Y., Chen, Y. Chen, J., et al. 2011. Physiological mechanisms underlying OsNAC5-dependent tolerance of rice plants to abiotic stress. Planta 234:331-345.

Sthapit, B.R., Witcombe, J.R. 1998. Inheritance of tolerance to chilling stress in rice during germination and plumule greening. Crop Sci. 38:660-665.

Su, C.F., Wang, Y.C., Hsieh, T.H., et al. 2010. A novel MYBS3-dependent pathway confers cold tolerance in rice. Plant Physiol. 153:145-158.

Suh, J.P., Jeung, J.U., Lee, J.I., et al. 2010. Identification and analysis of QTLs controlling cold tolerance at the reproductive stage and validation of effective QTLs in cold-tolerant genotypes of rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 120:985-995.

Suh, J.P., Lee, C.K., Lee, J.H., et al. 2012. Identification of quantitative trait loci for seedling cold tolerance using RILs derived from a cross between *japonica* and tropical *japonica* rice cultivars. Euphytica 184:101-108.

Suzuki, K., Nagasuga K., Okada, M. 2008. The chilling injury induced by high root temperature in the leaves of rice seedlings. Plant Cell Physiol. 49:433-442.

Sweetlove, L., Foyer, C. 2004. Roles for reactive oxygen species and antioxidants in plant mitochondria. p. 307-317. In Day, D., Millar, A., Whelan, J. (eds.) Plant mitochondria: From genome to function. Advances in photosynthesis and respiration. Vol. 14. Springer, Dordrecht, The Netherlands.

Takesawa, T., Ito, M., Kanzaki, H., et al. 2002. Over-expression of ζ glutathione S-transferase in transgenic rice enhances germination and growth at low temperature. Mol. Breed. 9:93-101.

Takeuchi, Y., Hayasaka, H., Chiba, B., et al. 2001. Mapping quantitative trait loci controlling cool-temperature tolerance at booting stage in temperate *japonica* rice. Breed. Sci. 51:191-197.

Tian, Y., Zhang, H., Pan, X., et al. 2011. Overexpression of ethylene response factor TERF2 confers cold tolerance in rice seedlings. Transgenic Res. 20:857-866.

Tsugane, K., Kobayashi, K., Niwa, Y., et al. 1999. A recessive *Arabidopsis* mutant that grows photoautotrophically under salt stress shows enhanced active oxygen detoxification. Plant Cell 11:1195-1206.

Verma, S.K., Xalxo, M.S., Saxena, R.R., et al. 2014. Identification of QTLs for cold tolerance at seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.) Indian J. Genet. Plant Breed. 74:86-89.

Wang, Q., Guan, Y., Wu, Y., et al. 2008. Overexpression of a rice *OsDREB1F* gene increases salt, drought, and low temperature tolerance in both *Arabidopsis* and rice. Plant Mol. Biol. 67:589-602.

Wang, D., Liu, J., Li, C., et al. 2016. Genome-wide association mapping of cold tolerance genes at the seedling stage in rice. Rice 9:61.

Woodi, M., Mondal, A.K., Padmanabhan, B., et al. 2009. Analysis of protein posttranslational modifications by mass spectrometry: With special reference to haemoglobin. Indian J. Clin. Biochem. 24:23-29.

Xie, G., Kato, H., Imai, R. 2012. Biochemical identification of the OsMKK6-OsMPK3 signaling pathway for chilling stress tolerance in rice. Biochem. J. 443:95-102.

Xin, Z., Browse, J. 2001. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures. Plant Cell Environ. 23:893-902.

Xiong, L., Yang, Y. 2003. Disease resistance and abiotic stress tolerance in rice are inversely modulated by an abscisic acid-inducible mitogen-activated protein kinase. Plant Cell 15:745-759.

Xu, M., Li, L., Fan, Y., et al. 2011. *ZmCBF3* overexpression improves tolerance to abiotic stress in transgenic rice (*Oryza sativa*) without yield penalty. Plant Cell Rep. 30:1949-1957.

Xu, L.M., Zhou, L., Zeng, Y.W., et al. 2008. Identification and mapping of quantitative trait loci for cold tolerance at the booting stage in a *japonica* rice near isogenic line. Plant Sci. 174:340-347.

Yang, A., Dai, X., Zhang, W.H. 2012. A R2R3-type MYB gene, *OsMYB2*, is involved in salt, cold, and dehydration tolerance in rice. J. Exp. Bot. 63:2541-2556.

Yang, Z., Huang, D., Tang, W., et al. 2013. Mapping of quantitative trait loci underlying cold tolerance in rice seedlings via high-throughput sequencing of pooled extremes. PLoS One 8:e68433.

Yang, L., Wang, J., Lei, L., et al. 2018. QTL mapping for heading date, leaf area and chlorophyll content under cold and drought stress in two related recombinant inbred line populations (*Japonica* rice) and meta-analysis. Plant Breed. 137:527-545.

Ye, H., Du, H., Tang, N., et al. 2009. Identification and expression profiling analysis of TIFY family genes involved in stress and phytohormone responses in rice. Plant Mol. Biol. 71:291-305.

Ye, C., Fukai, S. Godwin, I.D., et al. 2010. A QTL controlling low temperature induced spikelet sterility at booting stage in rice. Euphytica 176:291-301.

Yin, G., Sun, H., Xin, X., et al. 2009. Mitochondrial damage in the soybean seed axis during imbibition at chilling temperatures. Plant Cell Physiol. 50:1305-1318.

Yoshida, S. 1981. Climatic environment and its influence. p. 72. In Yoshida, S. (ed.) Fundamentals of rice crop science. The International Rice Research Institute. Manila, Philippines.

Zelman, A.K., Dawe, A., Gehring, C., et al. 2012. Evolutionary and structural perspectives of plant cyclic nucleotide-gated cation channels. Front. Plant Sci. 3: 95.

Zhang, Q., Chen, Q., Wang, S., et al. 2014a. Rice and cold stress: methods for its evaluation and summary of cold tolerance-related quantitative trait loci. Rice 7:24.

Zhang, Q., Jiang, N., Wang, G.L., et al. 2013. Advances in understanding cold sensing and the cold-responsive network in rice. Adv. Crop Sci. Technol. 1:104.

Zhang, Z., Li, J., Pan, Y., et al. 2017. Natural variation in *CTB4a* enhances rice adaptation to cold habitats. Nature Commun. 8:14788.

Zhang, J., Li, J., Wang, X., et al. 2011. *OVP1*, a vacuolar H+-translocating inorganic pyrophosphatase (V-PPase), overexpression improved rice cold tolerance. Plant Physiol. Biochem. 49:33-38.

Zhang, Z., Su, L., Li, W., et al. 2005. A major QTL conferring cold tolerance at the early seedling stage using recombinant inbred lines of rice (*Oryza sativa* L.) Plant Sci. 168:527-534.

Zhang, S., Zheng, J., Liu, B., et al. 2014b. Identification of QTLs for cold tolerance at seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.) using two distinct methods of cold treatment. Euphytica 195:95-104.

Zhao, J., Zhang, S., Dong, J., et al. 2017. A novel functional gene associated with cold tolerance at the seedling stage in rice. Plant Biotechnol. J. 15:1141-1148.

Zhou, L., Zeng, Y., Hu, G., et al. 2012. Characterization and identification of cold tolerant near-isogenic lines in rice. Breed. Sci. 62:196.

Zhou, Y., Zeng, Y., Zheng, W., et al. 2010. Fine mapping a QTL *qCTB7* for cold tolerance at the booting stage on rice chromosome 7 using a near-isogenic line. Theor. Appl. Genet. 121:895-905.

Zhu, J.K. 2016. Abiotic stress signaling and responses in plants. Cell. 167:313-324.

Capítulo 8. Estudio de la tolerancia al frío del arroz en Chile

Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Sang Bok- Lee.

Aunque en los últimos 30 años la producción mundial de arroz se ha duplicado debido a la introducción de nuevas variedades de alto rendimiento y la optimización de las prácticas agrícolas, este incremento sigue siendo insuficiente para hacer frente a las demandas globales (Fischer et al., 2000). Se prevé que la oferta mundial de arroz aumentará en alrededor de 1 % por año hasta el 2025 (Maclean et al., 2002), menor a la tasa de crecimiento de la población de Asia que bordea al 1,6 % anual (Danty y Muñoz, 2010).

La acelerada pérdida de tierras productivas, la subida del nivel del mar, la salinización, la erosión y los asentamientos humanos, hacen que el rendimiento promedio de 4.4 t ha^{-1} sea insuficiente para la gran demanda futura del resto del mundo. Además de estos problemas, el cultivo de arroz se ve enfrentado a diferentes circunstancias de estrés propias del clima. El estrés en las plantas se define como cualquier condición desfavorable o sustancia que afecte o bloquee el metabolismo, el crecimiento y el desarrollo de la planta (Lichtenthaler, 1996). Debido a su origen tropical y subtropical, la planta de arroz posee una alta sensibilidad a temperaturas bajo los 15 °C. De hecho, cerca de 15 millones de hectáreas de arroz sembradas anualmente en el mundo experimentan estrés por frío en diferentes etapas de desarrollo como en la germinación, y en la fase vegetativa y reproductiva (Wang et al., 2006).

Chile es la región más austral del mundo donde se cultiva el arroz. La zona sembrada con arroz posee un clima mediterráneo y está ubicada entre las regiones del Maule y Ñuble (35° a 36° latitud sur, respectivamente) (Donoso, et al., 2014). Su período de siembra a cosecha se extiende desde el mes de octubre hasta abril, por lo cual es posible cultivar una sola temporada al año (Alvarado y Hernaíz, 2007). Análisis de los registros históricos de temperaturas en Chile, han determinado que la planta de arroz debe soportar temperaturas subóptimas durante todos sus estados de desarrollo (Donoso y Paredes, 2013; Alvarado y Hernaíz, 2007), por lo que el frío es el factor abiótico más importante que afecta la producción de arroz en el país (Alvarado y Grau, 1991). El análisis de 40 años de datos de temperaturas de la zona más austral donde se cultiva el arroz en Chile, señala que la media de las temperaturas mínimas puede variar entre 5 y 10 °C en las etapas vegetativa y reproductiva, respectivamente (Alvarado y Hernaíz, 2007). En el año 2009 se registraron 17 eventos de temperaturas inferiores a 10 °C, entre enero y febrero, destacándose 2 d con mínimas de 6 °C en enero, y un día con una temperatura mínima inferior a 5 °C durante la primera semana de febrero.

Las bajas temperaturas pueden llegar a ser responsables de hasta un 40 % de pérdida de rendimiento en la producción de arroz en Chile, en años donde se presentan bajas temperaturas (Alvarado y Hernaíz, 2007). De hecho, la evaluación del efecto de la temperatura sobre el período de crecimiento (siembra a floración y siembra a macolla) en las variedades ´Quella-INIA`, ´Ñiquén-INIA`, ´Diamante–INIA` y ´Oro`, determinó una relación lineal negativa entre el largo del período vegetativo y las temperaturas medias. Es decir, las temperaturas bajas alargan el período vegetativo y, por el contrario, las altas temperaturas reducen el período vegetativo de la planta de arroz (Alvarado y Grau, 1991).

Debido a que el sector arrocero de Chile se encuentra frecuentemente expuesto a temperaturas frías en todas las etapas del desarrollo, se han realizado una serie de estudios con el fin de buscar metodologías adecuadas para la evaluación y selección de genotipos tolerantes al frío, en las diferentes etapas fenológicas del cultivo. Esta sección reúne toda la información disponible de estudios de tolerancia a frío en el cultivo de arroz, desarrollados en nuestro país hasta la fecha.

Tolerancia al frío en la etapa de germinación

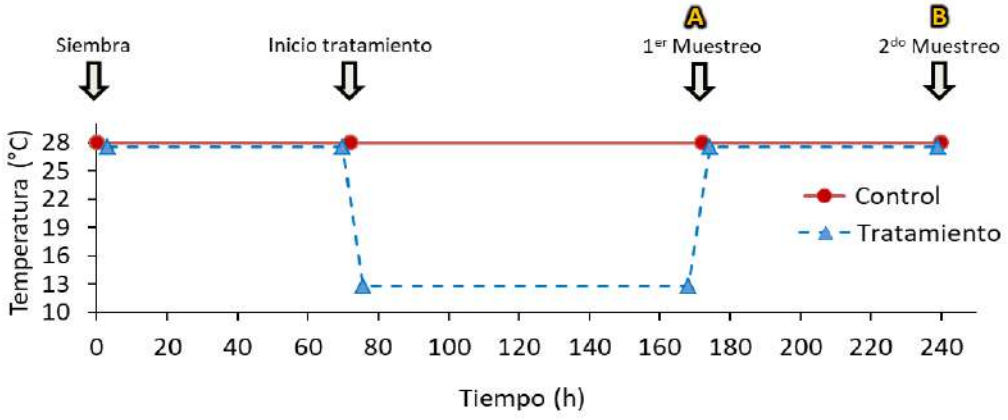
En Chile, el arroz se siembra mayoritariamente utilizando semilla pregerminada en un régimen de inundación (Alvarado y Hernaíz, 2007) en los dos primeros meses de primavera, con temperaturas mínimas del aire que normalmente están bajo los 10 °C, lo que resulta inferior a la temperatura óptima para la germinación del arroz (Yoshida et al., 1996). La germinación a bajas temperaturas puede causar un crecimiento lento y una reducción en el vigor de las plántulas (Ali et al., 2006). Para abordar este problema, se han desarrollado variadas metodologías para evaluar la tolerancia al frío en el arroz en la etapa de germinación como: índice de germinación a 13 °C durante 28 d; crecimiento del coleóptilo a 13 °C durante tres d y rebrote del coleóptilo durante 4 d a 28 °C (Cruz y Milach, 2004); tasa de imbibición, tasa de germinación, índice de germinación, longitud de la raíz, longitud del brote y vigor de la semilla a 14 °C durante 23 d (Wang et al., 2009); coeficiente de germinación a 10 , 13 y 15 °C (Baruah et al., 2009); tasa de germinación, longitud de coleóptilo y longitud de la radícula a 13 y 17 °C durante 28 d (Sharifi y Aminpanah, 2010).

La evaluación de genotipos para detectar tolerancia al frío es muy importante para mejorar las variedades de arroz en Chile. Los primeros estudios se realizaron bajo el alero del convenio INIA-CIAT. Estos trabajos determinaron una relación positiva entre la sumatoria de las temperaturas medias durante el período de desarrollo del cultivo y el rendimiento en grano, esperándose un bajo rendimiento con una sumatoria de temperatura de 2.700 °C, un rendimiento intermedio entre 2.700 y 2.850 °C y alto rendimiento con sumatorias de temperaturas mayores a 2.850 °C (Alvarado y Grau, 1991). Estos estudios determinaron también que las variedades responden en forma diferente a las bajas temperaturas en la etapa de germinación. Es así como las variedades ´Quella-INIA`, ´Diamante-INIA` y ´Oro` presentaron una mayor sobrevivencia de plantas en el campo, cuando fueron sembradas en diferentes fechas de siembra. Esta mayor sobrevivencia de plantas estuvo relacionaba con la sumatoria de la temperatura base 10 de los primeros 5 d de siembra. Un estudio posterior, con 100 genotipos, demostró también la presencia de una importante variación genética en relación a la sobrevivencia de las plantas sembradas en diferentes épocas de siembra, y la posibilidad de seleccionar aquellos genotipos más tolerantes para ser utilizados como progenitores en el programa de mejoramiento genético (Alvarado y Grau, 1991).

Posteriormente, otro estudio permitió la evaluación de 167 genotipos por su tolerancia al frío en la etapa de germinación en Chile (Castillo y Alvarado, 2002). Este estudio utilizó como criterio de tolerancia al frío el desarrollo del coleóptilo y la radícula después de un tratamiento de frío a la semilla al estado Z0.0 (semilla seca), a 13 °C durante 35 d, utilizando como testigo tolerante a la variedad ´Diamante-INIA`. En el caso de la germinación en estado Z0.7 (arroz pregerminado), se evaluó la respuesta de 187 genotipos de arroz a 13 °C en periodos de exposición de 5 y 15 d bajo una lámina de agua de 3 cm. La evaluación consistió en la determinación de la sobrevivencia posterior a una recuperación de 10 d en condiciones de temperatura promedio de 25 °C. Al estado Z0.0 la germinación disminuyó de 86 % en condiciones ideales a 26 % posterior al tratamiento de frío. De los genotipos analizados sólo el 8,6 % fue considerado como tolerante, donde uno de los genotipos (CH 530-14) superó al testigo tolerante, ´Diamante-INIA`. En el caso de las evaluaciones en Z0.7, las variedades ´Diamante-INIA`, ´Brillante-INIA` y ´Oro` fueron considerados como tolerantes al frío, ya que obtuvieron un porcentaje de sobrevivencia sobre un 74 %. La comparación de los tratamientos evaluados mostró que el mayor efecto del frío se observó en el estado Z0.0 (Castillo y Alvarado, 2002).

Entre los métodos utilizados para la evaluación de la tolerancia a frío en la etapa de germinación, el estudio de la reducción y el rebrote del coleóptilo después del frío, utilizado por Cruz y Milach (2004), es una buena aproximación, ya que considera un criterio que permite discriminar e identificar progenitores y progenies con una alta tolerancia al frío. Esta metodología, con algunas modificaciones, fue utilizada para evaluar 29 genotipos de arroz provenientes del banco de germoplasma del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Donoso et al., 2013a). Dentro de

estos 29 genotipos figuran tres variedades chilenas (´Diamante-INIA`, ´Oro` y ´Brillante-INIA`), 20 líneas avanzadas (Quila 157302, Quila 233008, Quila 225001, Quila 225103, Quila 228603, Quila 230513, Quila 230601, Quila 230602, Quila 230603, Quila 231902, Quila 235207, Quila 242104, Quila 216305, Quila 154601, Quila 154804, Quila 156603, Quila 159005, Quila 173201, Quila 185007, Quila 241309) y cinco variedades procedentes del extranjero, dos de ellas provenientes de España (´Guadiamar`, ´Susan`), una de U.S.A. (´Karolina`), India (´Sugandh-2`) y China (´Chu Xiang`). Las semillas de los distintos genotipos de arroz fueron sembradas en cajas magenta, usando como sustrato 100 g de vermiculita humedecida con 100 ml de agua destilada.



Fuente: Donoso et al., 2013a.

Figura 1. Cuadro explicativo de la metodología en relación con el tiempo.

Las semillas de los 20 genotipos fueron mantenidas en oscuridad a 28 °C por 72 h y luego se reguló la temperatura a 13 °C por 96 horas. En el tratamiento control, se dejó la temperatura constante a 28 °C por los 10 d que duró el experimento. A los siete d de iniciado el experimento, se midió el crecimiento mediante una imagen de los coleóptilos obtenida a través de un escáner (Hewlett Packard Scajet, G-3010). Las semillas germinadas se volvieron a sembrar y se ubicaron nuevamente a la incubadora a 28 °C por 72 horas, lo cual correspondió al período de recuperación posterior a la aplicación del tratamiento de frío (Figura 1). Las evaluaciones se realizaron posteriormente, mediante un programa computacional (SigmaScan, Pro 5, SPSS Inc). Al término del tercer y décimo día, se realizaron las dos mediciones del rebrote del coleóptilo. Los resultados obtenidos permitieron realizar varios rankings de tolerancia al frío de los genotipos evaluados.

Para la elaboración del primer ranking se utilizó la diferencia entre longitud del coleóptilo tratado con frío (13 °C) y el control (28 °C), en el primer muestreo (A). Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

Diferencia Longitud = (Longitud coleóptilo 28 °C en A) – (Longitud coleóptilo 13 °C en A)

En segundo lugar, se elaboró un nuevo ranking, utilizando el porcentaje de crecimiento en longitud del coleóptilo sometido a 13 °C en relación al control (28 °C), en el primer muestreo (A). Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

Porcentaje de crecimiento = (Longitud coleóptilo a 13 °C en A) x 100 / (Longitud coleóptilo a 28 °C en A)

En tercer lugar, se realizó otro ranking utilizando la diferencia de longitud respecto al control, en

el segundo muestreo (B). Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

Diferencia Longitud Total = (Longitud total a 28 °C en B) – (Longitud total a 13 °C en B)

En cuarto lugar, se realizó otro ranking utilizando el porcentaje de crecimiento en longitud a 13 °C, respecto al control (28 °C), en el segundo muestreo (B). Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

Porcentaje Longitud Total = (Longitud total a 13 °C en B) x 100 / (Longitud total a 28 °C en B)

En quinto lugar, se elaboró otro ranking asociado al rebrote del coleóptilo, utilizando la diferencia de la longitud del coleóptilo en el tratamiento (13 °C) en el segundo muestreo (B), menos la longitud en el tratamiento (13 °C) en el primer muestreo (A). Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

Rebrote coleóptilo 13 °C = (longitud a 13 °C en B) – (Longitud a 13 °C en A)

En sexto lugar, se elaboró otro ranking utilizando la relación entre el rebrote del coleóptilo sometido a 13 °C y el crecimiento del coleóptilo entre el primer y segundo muestro en el control (28 °C). Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

Porcentaje de rebrote de coleóptilo = (Rebrote coleóptilo 13 °C) x 100 / (Crecimiento coleóptilo 28 °C)

Donde:

Rebrote coleóptilo 13 °C = (longitud a 13 °C en B) – (Longitud a 13 °C en A) y

Crecimiento coleóptilo 28 °C = (Longitud coleóptilo a 28 °C en B) – (Longitud coleóptilo a 28 °C en A)

Los datos obtenidos fueron analizados a través de una ANOVA de una vía, utilizando la separación de medias, mediante el test de Tukey ($P<0.05$). Cada experimento contó con 3 réplicas, donde cada réplica correspondió a 15 pseudo-réplicas o plantas de arroz. Para la normalización de los datos, éstos fueron transformados mediante logaritmo, según fue necesario.

En primer lugar, se determinó la diferencia de longitud del coleóptilo sometido a 13 °C respecto a su control crecido a 28 °C, donde una mayor diferencia indicaba menor tolerancia. Esta característica expresaba la reducción del crecimiento del largo del coleóptilo por efecto del frío, en relación a la temperatura control para cada genotipo. Los resultados señalaron que las diferencias de crecimiento entre los genotipos expuestos al frío y sus respectivos controles, variaron entre 45,7 mm a 87,5 mm (Figura 2). La variedad ´Diamante-INIA`, considerada tolerante al frío, tuvo un valor promedio del largo del coleóptilo de 78,9 mm. Por otro lado, las variedades chilenas ´Brillante-INIA` y ´Oro`, tuvieron un valor promedio de 67.0 mm, 57,8 mm, respectivamente. Las líneas experimentales presentaron valores entre 45,7 mm y 84,1 mm. De las líneas extranjeras, el mayor valor fue obtenido para ´Karolina` (87,5 mm) seguido de ´Guadiamar` (66,4 mm), ´Chu Xiang` (66,1 mm), ´Sugandh-2` (58,4 mm) y ´Susan` (57,2 mm). La comparación porcentual entre los genotipos expuestos al frío, comparados con sus respectivos controles donde los mayores porcentajes representan mayor tolerancia al frío, señaló que los valores variaron entre 8,9 % a 21,2 % (Figura 3). En condiciones de frío, ´Diamante-INIA`, ´Oro` y ´Brillante-INIA` tuvieron un porcentaje de crecimiento del coleóptilo de un 18,4 %, 18,7 % y 16 %, respectivamente. El porcentaje de crecimiento para las variedades extranjeras fueron de un 21,2 % para ´Chu Xiang`, 15 % para ´Susan`, 13,6 % para ´Karolina`, 12,4 % para ´Sugandh-2` y 10,6 % para ´Guadiamar`.

La diferencia entre la longitud final de los genotipos expuestos al frío respecto a sus controles, indicó que, a menor diferencia, mayor es la tolerancia. Los valores variaron entre 10,8 mm a 60,8 mm (Figura 4). Para la variedad 'Diamante-INIA' esta diferencia fue de 17,5 mm en promedio,

mientras que ´Brillante-INIA` y ´Oro` presentaron una diferencia de 13,3 mm y 10,8 mm, respectivamente. En tanto, de las variedades extranjeras ´Karolina` obtuvo el mayor valor (53,5 mm), seguido por ´Sugandh-2` con 44,3 mm, ´Guadiamar` con 37,6 mm, ´Susan` con 36,3 mm y ´Chu Xiang` con 36 mm. La comparación porcentual de genotipos expuestos al frío con los controles, obtuvo valores que variaron entre 53,3 % a 95,1 % (Figura 5). Un mayor porcentaje representa mayor recuperación y, por lo tanto, mayor tolerancia. Para la variedad ´Diamante-INIA` esta diferencia fue de 84,6 % para ´Brillante-INIA` de 93,4 % y para ´Oro` 95,1 %. El porcentaje de crecimiento para las variedades extranjeras ´Susan`, ´Karolina`, ´Chu Xiang`, ´Guadiamar` y ´Sugandh-2` fue de 66,8 %, 65,4 %, 65,2 %, 62,4 % y 58,3 %, respectivamente.

El rebrote del coleóptilo de cada genotipo sometido a frío mostró valores que variaron entre 48,2 y 90,6 mm (Figura 6). A mayor valor, mayor es la tolerancia al frío. Para las variedades chilenas el rebrote promedio fue de 78,6 mm para ´Diamante-INIA`, 77,4 mm para ´Brillante-INIA` y 65,5 mm para ´Oro`. De las variedades extranjeras, la de mejor respuesta al frío fue ´Guadiamar` con 57,1 mm, seguido de ´Karolina` con 71,1 mm, ´Susan` con 74,8 mm, ´Chu Xiang` con 65,5 mm y ´Sugandh-2` con 71,7 mm. También se midió la proporción del rebrote del coleóptilo de cada genotipo, respecto del largo generado en ese mismo periodo en los controles, donde a mayor porcentaje mayor es la recuperación después de ser sometidos al frío (Figura 7).

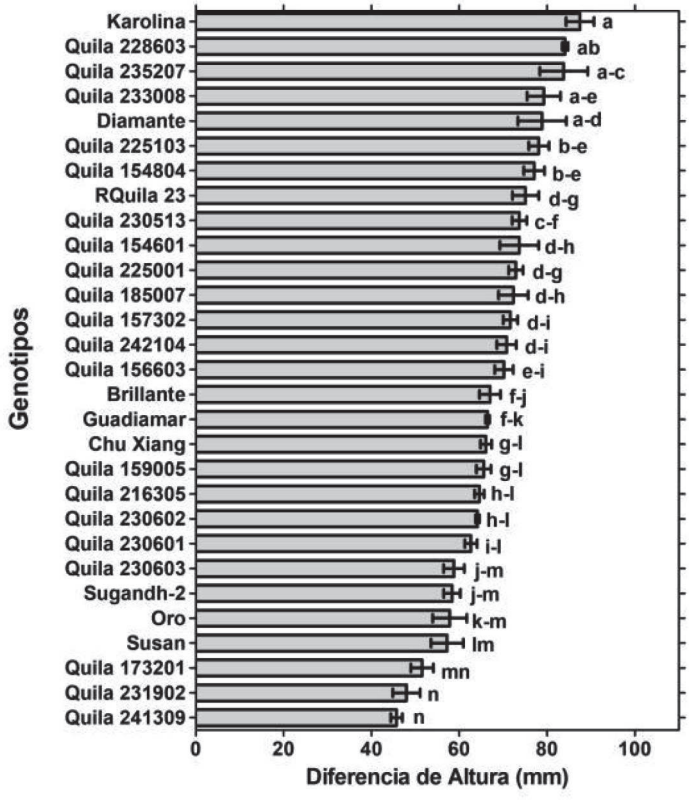


Figura 2. Diferencia de longitud del coleóptilo de 29 genotipos de arroz germinados a 28 °C por 72 h y 13 °C por 96 h respecto del control. Análisis estadísticos mediante ANOVA de una vía con test de Tukey ($P \leq 0,05$). La barra de error corresponde al error estándar. Las letras indican las diferencias entre los genotipos (Adaptado de Donoso et al., 2013a).

Figura 3. Porcentaje de longitud de los genotipos expuestos a bajas temperaturas con respecto a su control de 29 genotipos de arroz germinados a 28 °C por 72 h y 13 °C por 96 h. Análisis estadísticos mediante ANOVA de una vía con test de Tukey ($P \leq 0{,}05$). La barra de error corresponde al error estándar. Las letras indican las diferencias entre los genotipos (Adaptado de Donoso et al., 2013a).

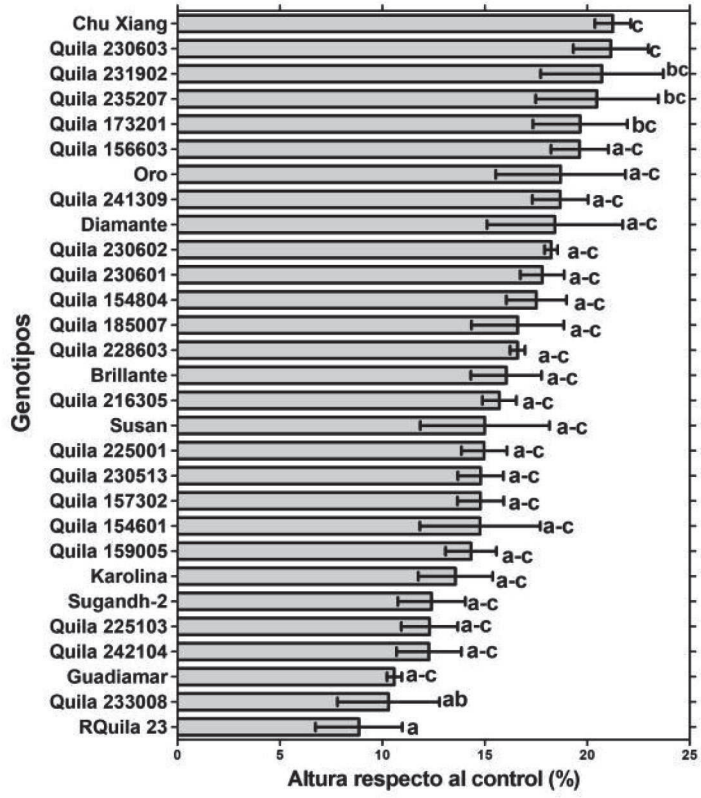
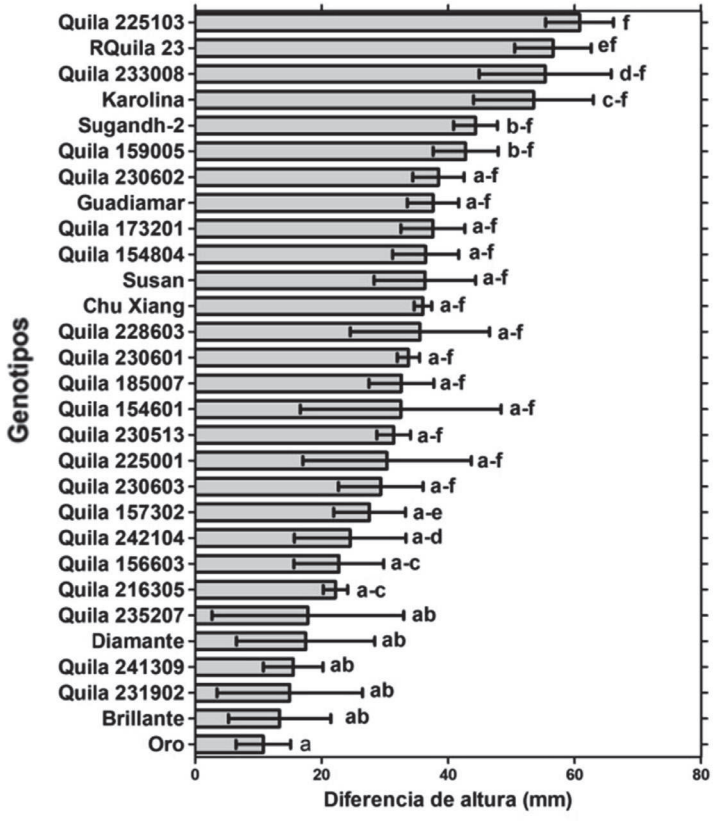


Figura 4. Diferencia de la longitud total del coleóptilo de 29 genotipos de arroz germinados a 28 °C por 72, 13 °C por 96 h y a 28 °C por 72 h, respecto del control. Análisis estadísticos mediante ANOVA de una vía con test de Tukey ($P \leq 0{,}05$). La barra de error corresponde al error estándar. Las letras indican las diferencias entre los genotipos (Adaptado de Donoso et al., 2013a).



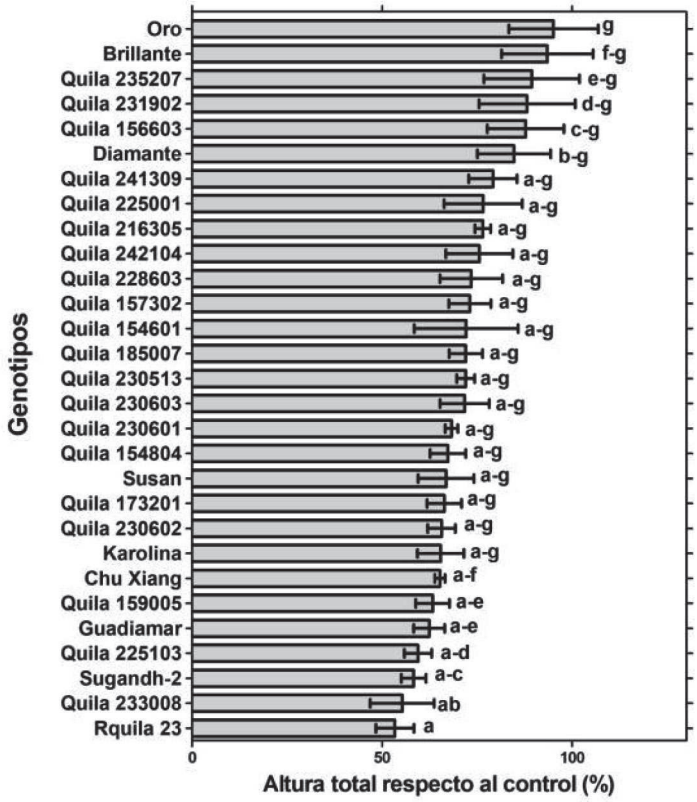


Figura 5. Porcentaje de la longitud total, respecto al control del coleóptilo de 29 genotipos de arroz germinados a 28 °C por 72 h, 13 °C por 96 h y 28 °C por 72 h. Análisis estadísticos mediante ANOVA de una vía con test de Tukey ($P \leq 0,05$). La barra de error corresponde al error estándar. Las letras indican las diferencias entre los genotipos (Adaptado de Donoso et al., 2013a).

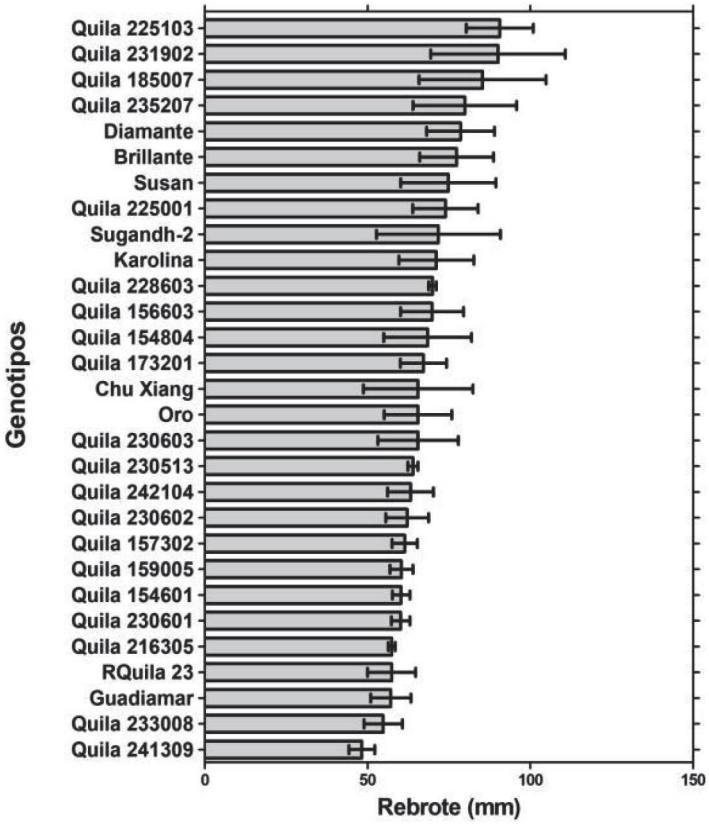


Figura 6. Rebrote del coleóptilo de 29 genotipos de arroz germinados a 28 °C por 72 h, 13 °C por 96 h y 28 °C durante 72 h. Análisis estadísticos mediante ANOVA de una vía con test de Tukey ($P \leq 0,05$). La barra de error corresponde al error estándar. Las letras indican las diferencias entre los genotipos (Adaptado de Donoso et al., 2013a).

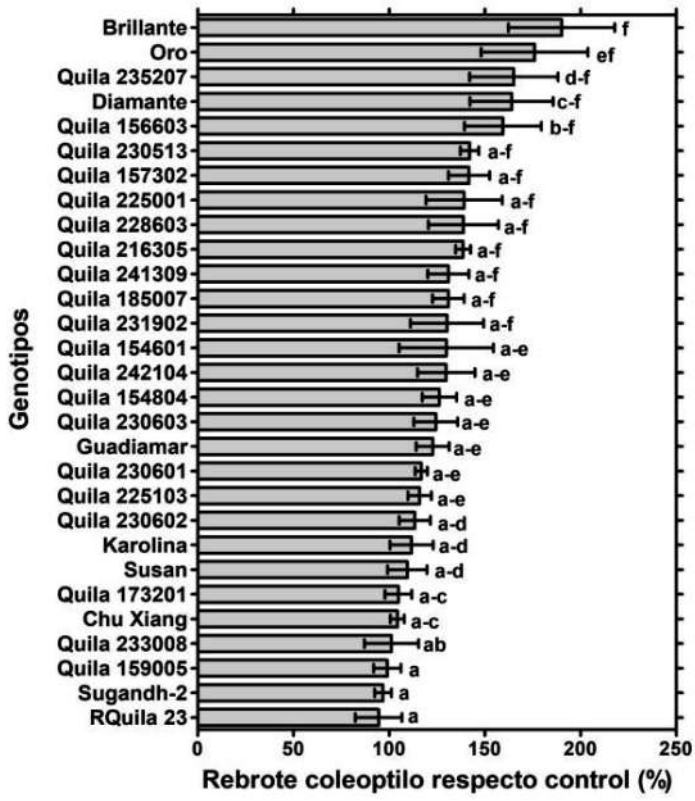


Figura 7. Rebrote del coleóptilo respecto al control (%) de 29 genotipos de arroz germinados a 28 °C por 72 h, 13 °C por 96 h y 28 °C durante 72 h. Análisis estadísticos mediante ANOVA de una vía con test de Tukey ($P \leq 0,05$). La barra de error corresponde al error estándar. Las letras indican las diferencias entre los genotipos (Adaptado de Donoso et al., 2013a).

En general, se observó una disminución del tamaño del coleóptilo posterior al tratamiento de frío en todos los genotipos estudiados. Es importante mencionar que los rankings relacionados con ´porcentaje de longitud de los genotipos expuestos a bajas temperaturas con respecto a su control`, ´diferencia de la longitud total del coleóptilo`, ´rebrote del coleóptilo` y ´rebrote del coleóptilo respecto al control`, no lograron una buena separación de los genotipos respecto a su tolerancia al frío. Por ello, fueron consideradas como una primera aproximación, pero insuficiente para realizar una clasificación más robusta de su tolerancia. Sin embargo, los rankings relacionados con ´la diferencia de longitud del coleóptilo` y ´porcentaje de la longitud total respecto al control`, contribuyeron a detectar diferencias sustanciales que permitieron separar los genotipos en susceptibles y tolerantes.

Las variedades ´Oro` y ´Brillante-INIA` se ubicaron en el grupo de los genotipos tolerantes, con el mayor porcentaje de crecimiento del coleóptilo, después de haber sido sometidas al frío. Por otro lado, la variedad ´Karolina` proveniente de Hungría, mostró un nivel bajo de tolerancia al frío, posiblemente debido a que fue desarrollada para crecer en zonas con temperaturas superiores a las de nuestro país. Entre los genotipos medianamente tolerantes se encuentran las variedades españolas ´Susan` y ´Guadiamar` y las variedades asiáticas ´Chu Xiang` y ´Sugandh-2`. Para la etapa de germinación, la variedad ´Diamante-INIA` fue clasificada como medianamente tolerante. En este contexto, es importante realizar nuevos experimentos con temperaturas menores a 13 °C para poder incrementar la presión de selección respecto a la tolerancia a frío.

La reducción del crecimiento del coleóptilo en la etapa de germinación se debe al efecto directo de las bajas temperaturas en la elongación y división celular o un efecto indirecto en el metabolismo de la semilla durante el proceso de germinación (Cruz y Milach, 2004). A diferencia de otros cereales, el arroz es sensible a temperaturas bajo 20 °C y no se aclimata a temperaturas de congelamiento. El rango de temperatura óptimo para el crecimiento de la plántula de arroz está entre 20 y 35 °C (Yoshida, 1981). Bajas temperaturas (10 a 15 °C) durante estos periodos pueden causar daño a la plántula en los estados tempranos de establecimiento que, a menudo,

resultan en un bajo vigor de la planta (de los Reyes et al., 2003). Por ello, la tolerancia a frío es necesaria para obtener un rápido y uniforme establecimiento de la plántula de arroz (da Cruz et al., 2006).

Análisis proteómico de la tolerancia al frío en la etapa de germinación

La germinación, por definición, se inicia con la absorción de agua por la semilla seca y termina con la emergencia de la radícula (Bewley, 1997), siempre que las condiciones de humedad y temperatura sean las adecuadas. En base a la absorción de agua, la germinación se puede distribuir en tres fases: una fase rápida de absorción de agua (Fase I), seguido por la fase de estabilización de absorción de agua (Fase II), y por último la fase de inicio de crecimiento (Fase III) (Yang et al., 2007). Durante la imbibición de la semilla, la absorción de agua restaura la actividad metabólica, lo que produce cambios fisiológicos y bioquímicos (Bewley y Black, 1994). En esta etapa, las células embrionarias en reposo pasan a un estado metabólico activo (Sheoran et al., 2005). La germinación y posterior crecimiento de las plántulas necesitan cantidades de energía y de nutrientes que sólo pueden ser proporcionados por la propia semilla, porque carece de un sistema de absorción de minerales y aparato fotosintético (Bewley, 1997), por lo cual es indispensable la movilización de reservas de energía durante la germinación de la semilla.

En la semilla las reservas se almacenan, principalmente, en forma de lípidos, carbohidratos y proteínas en el endosperma (Deng et al., 2013). Las proteínas desempeñan un rol fundamental para el crecimiento y desarrollo a nivel estructural, de defensa, enzimático, homeostático y de transducción de señales (Tan et al., 2013). Funcionalmente, las diferentes proteínas presentes en el embrión están relacionadas con el crecimiento y división celular, almacenaje, metabolismo, producción de energía, transporte en membranas celulares, síntesis de nuevas proteínas, transcripción y estrés (Cheng et al., 2010). Las proteínas destinadas a la síntesis de fitohormonas son las encargadas de promover el proceso de germinación. Sin embargo, para que esta situación ocurra, es necesaria a una temperatura adecuada que permita la catalización de estas reacciones. Es por ello que las semillas de arroz sometidas a estrés por frío tienen un bajo o nulo crecimiento del embrión y un bajo porcentaje de germinación.

Los conocimientos acerca de los mecanismos moleculares y fisiológicos subyacentes a los efectos ambientales sobre la germinación son escasos. En los últimos 20 años, la proteómica, ciencia que estudia a gran escala, particularmente, la estructura y función de las proteínas (Barkla et al., 2013), se ha convertido en una herramienta importante para identificar el perfil proteico en germinación de diferentes especies vegetales tales como soya (*Glycine max*) (Cheng et al., 2010), cebada (*Hordeum vulgare*) (Lee et al., 2011), maíz (*Zea mays*) (Huang et al., 2012), té (*Camellia sinensis*) (Chen et al., 2011), haya (*Fagus sylvatica*) (Pawlowski, 2007) y el arce de noruega (*Acer platanoides*) (Pawlowski, 2009), que han sido sometidos a diferentes estreses ambientales. Estos estudios han proporcionado una valiosa información de los procesos moleculares involucrados en la germinación (Tan et al., 2013). Es así como se han identificado un total de 561 proteínas, las que han presentado diversos patrones de expresión, dependiendo de las condiciones ambientales durante la germinación de la semilla. La investigación proteómica en arroz, ha seguido el mismo patrón de análisis realizados en otras especies vegetales (Deng et al., 2013).

El arroz es una planta monocotiledónea que ha sido usada como modelo en estudios genéticos y moleculares (Jain et al., 2006a; Li et al., 2011). En INIA se desarrolló un estudio tendiente a identificar el perfil proteico en la variedad ´Zafiro-INIA` y en la variedad ´Oryzica 1`, en el proceso de germinación en condiciones de bajas temperaturas (González et al., 2013). En primer lugar, para determinar el tiempo de extracción de embriones, se analizó la germinación de los dos genotipos bajo dos condiciones. En la primera condición se realizó la imbibición semillas de arroz a 12 °C, durante 216 horas (muestreando 10 semillas a las 0, 16, 24, 40, 48, 64, 72, 84, 96, 120, 144, 168, 192 y 216 horas). En la segunda condición, otro grupo de semillas de arroz fueron embebidas a 28 °C durante 25 h (muestreando 10 semillas a las 0, 9, 12, 15, 19, 21 y 25 h). Ambos

grupos de semillas se mantuvieron en oscuridad. Se utilizaron 200 semillas por cada una de las tres repeticiones. Para determinar la curva de imbibición, se desarrolló el mismo protocolo de germinación a 12 °C antes mencionado y se muestreó 10 semillas a las 0, 16, 24, 40, 48, 64, 72, 84, 96, 120, 144, 168, 192, y 216 h. Paralelamente, se determinó el peso húmedo de la semilla mantenida por 78 h con muestreos de 10 semillas a las 0, 6, 12, 24, 30, 42, 48, 60, 66, 72 y 78 h. Las semillas de ´Zafiro-INIA` y ´Oryzica 1` se germinaron según el protocolo anterior a 12 °C/120 h y 28 °C/12 horas (control). En cada repetición se colocaron 200 semillas de ´Zafiro-INIA` y 200 de ´Oryzica 1`.

La extracción de las proteínas de embriones de arroz se realizó utilizando el protocolo descrito por Wang et al. (2006). Las proteínas se cuantificaron siguiendo el protocolo de Bradford (1976) que se basa en la absorbancia de cada muestra a 595 nm. La separación de las proteínas se realizó, inicialmente, mediante un isoelectroenfoque (IEE) y posteriormente según su peso molecular, en un gel vertical de poliacrilamida (12,5 %). Los geles se tiñeron con azul de Coomassie y se digitalizaron en un escáner (Image Scanner III, Healthcare®). La detección de las proteínas y la comparación entre geles se logró mediante el software PD Quest Advanced (versión 8.0.1, Bio-Rad®). En los cortes longitudinales de los embriones de los genotipos de arroz estudiados en diferentes condiciones (Figura 8), se determinó que en el control (28 °C) la extrusión del coleóptilo se presentó a las 12 h en ´Zafiro-INIA` y a las 19 h en ´Oryzica 1`. Por otro lado, en los embriones expuestos a 12 °C, la extrusión del coleóptilo en ´Zafiro-INIA` se observó a las 120 horas, en comparación con los embriones de ´Oryzica 1` que no lograron crecer durante las 216 h que duró el experimento. Por esta razón, la extracción de proteínas en ambos cultivares se realizó a las 12 h en condiciones control y a las 120 h en condiciones de frío.

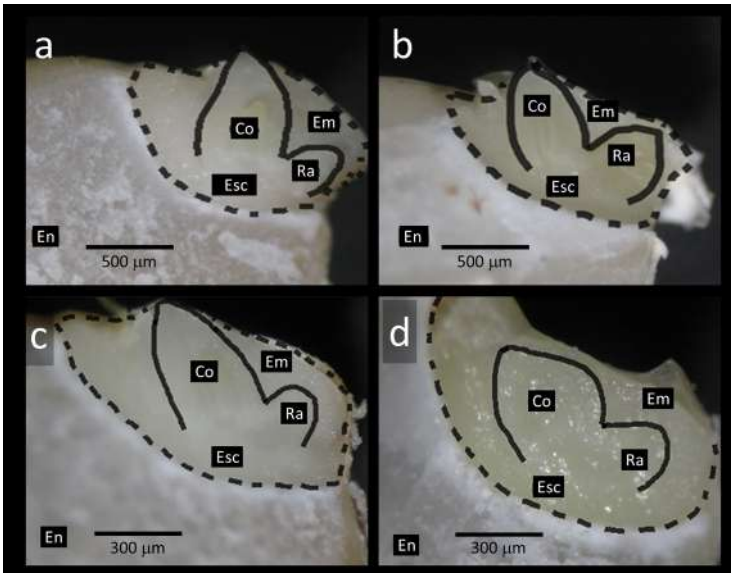


Figura 8. Cortes longitudinales de embriones de arroz ´Zafiro-INIA` (a y c) y ´Oryzica 1` (b y d) sometidos al tratamiento control (28 °C) por 12 h (a y b) y tratamiento con frío (12 °C) por 120 h (c y d). Estructuras: endosperma (En), embrión (Em), coleóptilo (Co), escutelo (Esc) y radícula (Ra) (Adaptado de González et al., 2013).

El momento de la extrusión del coleóptilo tiene relación con la velocidad del proceso germinativo de la semilla. Sin embargo, no tiene relación con la capacidad posterior de elongación del coleóptilo y la radícula (Massardo et al., 2000). Las bajas temperaturas inducen una disminución de solutos intracelulares, tales como aminoácidos y carbohidratos, debido al daño por el frío de la membrana plasmática, siendo la principal causa de las alteraciones metabólicas observadas en las células (Lyons, 1973). Las bajas temperaturas cambian el estado líquido del agua a estado de gel,

lo que conlleva a la contracción física de la membrana plasmática y a la apertura de los canales que aumentan la permeabilidad y, con ello la pérdida de biomoléculas y minerales (Cruz y Milach, 2004), produciendo un bajo crecimiento del coleóptilo.

Durante el proceso de germinación a 28 °C por 78 h, las semillas de ambos genotipos presentaron una curva de imbibición sigmoidea (Figura 9a) (Bewley, 1997). En ambos genotipos, la fase I se inició con la imbibición de las semillas y finalizó después de 6 horas. Posteriormente, la fase II se prolongó por 40 h y la fase III se inició con el crecimiento de la plántula. Durante las 78 h de observación, las semillas de ´Zafiro-INIA` y ´Oryzica 1` incrementaron su peso en un 69 y 67 %, respectivamente (Figura 9b). En el tratamiento con frío, sólo se observó la curva sigmoidea con sus tres fases en ´Zafiro-INIA`, ya que en ´Oryzica 1` sólo llegó la fase II hasta las 200 h (Figura 9c). La fase I, en ambos genotipos, finalizó después de 16 h. Para ´Zafiro-INIA`, la fase II se prolongó durante 164 h, culminando a las 180 h e iniciándose la fase III. El incremento del peso de semillas de ´Zafiro-INIA` y de ´Oryzica 1` en condiciones de frío fue de un 68 % y un 49 %, respectivamente (Figura 9d).

La germinación de la semilla se inicia con la absorción de agua por parte de la semilla y termina con el alargamiento del eje embrionario. Con la absorción del agua, se inician mecanismos germinativos asociados a la expresión de genes (Cheng et al., 2010). Las actividades metabólicas esenciales se reanudan y las enzimas hidratadas se activan para producir la energía necesaria para los posteriores procesos de crecimiento (Parrish y Leopold, 1977; McDonald et al., 1988). La exposición a bajas temperaturas afecta las vías metabólicas relacionadas con la germinación (Nijsse et al., 1998). En este trabajo se demostró que la semilla de ´Zafiro-INIA`, se embebe en condiciones de frío, alcanzando un peso de semilla similar a un proceso germinativo en condiciones óptimas. Sin embargo, el tiempo necesario para completar el proceso se retrasa en forma importante, ya que varía de horas en caso de condiciones óptimas, a días en condiciones de estrés por frío. Por otro lado, el proceso de imbibición se ve seriamente afectado en genotipos sensibles a bajas temperaturas como ´Oryzica 1`, el cual no logra completar el proceso.

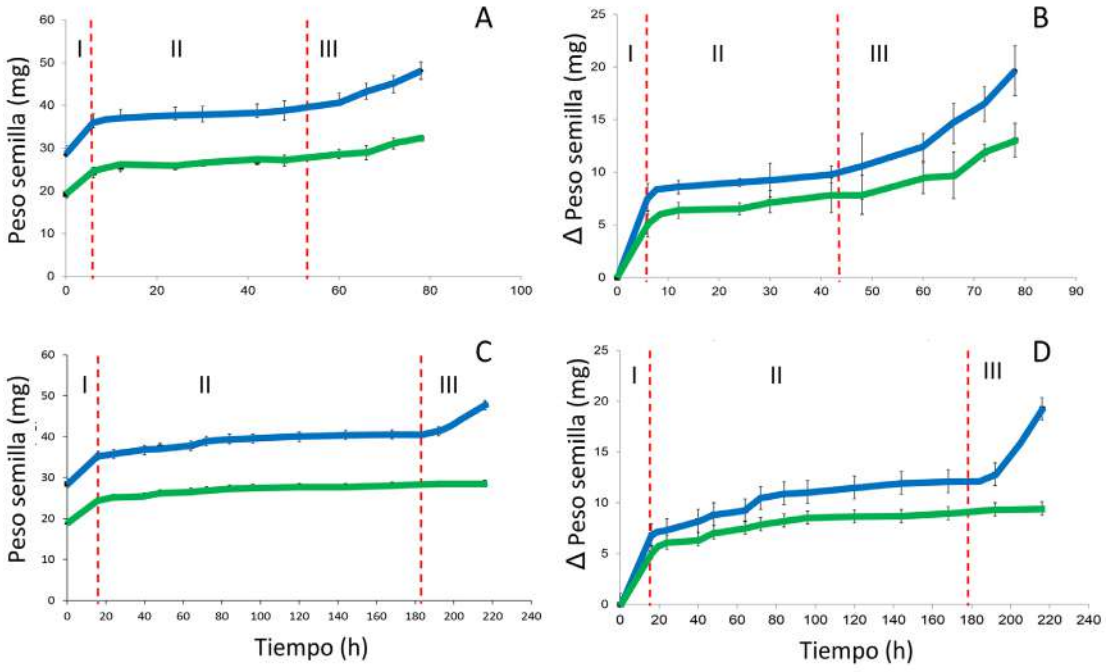


Figura 9. Curva de imbibición (A y C) y acumulación de peso (B y D) de los genotipos de arroz ´Zafiro-INIA` (línea azul) y ´Oryzica 1` (línea verde), sometidos a 28 °C (control; A y B) por 78 h y 12 °C por 216 h (C y D) (Adaptado de González et al., 2013).

Esta situación se podría atribuir a lesiones letales en la célula, que podrían ser las responsables del nulo crecimiento y, por ende, de la baja acumulación de peso durante este proceso (Ismail et al., 1999). Los resultados de ´Oryzica 1` muestran una alta sensibilidad a bajas temperaturas, ya que, con 3 y 4 d a baja temperatura, el peso de la semilla se mantiene. Estos resultados son similares a los obtenidos por Mejía y Pulver (1989), los cuales analizaron la germinación de ´Oryzica 1` a 12 °C, registrando al cuarto día una disminución de la viabilidad de las semillas, llegando a 0 % de supervivencia a los 10 d.

Posterior al análisis de la separación de proteínas en dos dimensiones de las dos variedades estudiadas, se detectaron en los geles 245 proteínas, de las cuales 190 proteínas presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Los perfiles proteicos fueron similares dentro del genotipo y diferentes entre los genotipos. Del total de proteínas evaluadas se seleccionaron las 32 proteínas (Figura 10) que mostraron las mayores diferencias. Dentro de ellas se observaron 10 proteínas exclusivas de ´Zafiro-INIA` (spot 2701, 3102, 5503, 6101, 6102, 6105, 6403, 6803, 7502 y 7707) (Figura 10 a y b), seis proteínas exclusivas de ´Oryzica 1` (spot 3201, 4005, 4510, 6003, 6408 y 8411) (Figura 10 c y d), seis proteínas que sólo comparten los genotipos sometidos al tratamiento control (spot 2305, 4901, 4908, 4913 y 9102) (Figura 10 a y c), una proteína en genotipos sometidos al tratamiento con frío (spot 2003) (Figura 10 b y d), y 10 proteínas que compartían ambos genotipos y tratamiento (spot 1301, 2101, 2601, 3101, 4701, 7305, 8201, 8207, 8501 y 9605) (Figura 10 a, b, c, y d).

El mapa proteómico de ´Zafiro-INIA` como de ´Oryzica 1`, no mostró cambios importantes debido al estrés por frío en relación a sus controles. Sin embargo, ambos cultivares presentaron una gran cantidad de diferencias en los patrones proteicos. Esta situación sugiere que la tolerancia al frío durante la germinación de ´Zafiro-INIA` podría deberse a proteínas constitutivas. Estas proteínas probablemente juegan un rol en la estrategia para tolerar temperaturas desfavorables en la etapa de germinación.

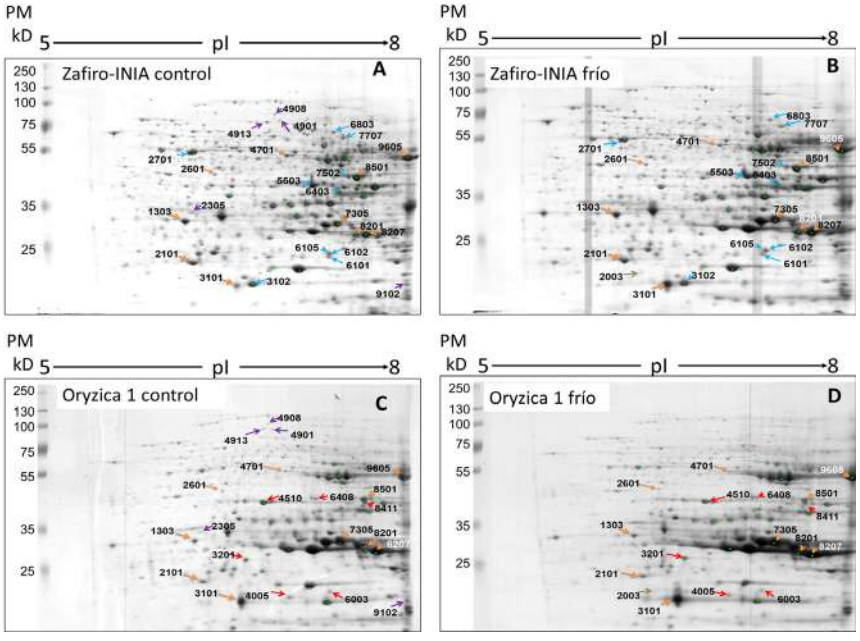


Figura 10. Identificación de algunas proteínas de arroz de ´Zafiro-INIA` (A y B) y ´Oryzica 1` (C y D) en geles de dos dimensiones. Flechas de color naranjo corresponde a proteínas comunes en todas las condiciones. Flechas de color celeste corresponden a proteínas expresadas solamente en variedad ´Zafiro-INIA` y flechas de color rojo corresponden a proteínas expresadas solamente en variedad ´Oryzica 1`. Flechas de color morado corresponden a proteínas expresadas solamente en condición de baja temperatura en ambas variedades (Adaptado de González et al., 2013).

Del total de proteínas expresadas (Figura 10) es probable que algunas jueguen un rol funcional, es decir, que le confieran tolerancia al frío al embrión de arroz. Durante la germinación, en las semillas hidratadas se activa el metabolismo, especialmente la movilización de macromoléculas de reserva (almidón, lípidos y aceites, y proteínas de almacenamiento) (Tan et al., 2013). Así, algunas de las proteínas involucradas en la germinación son sensibles a bajas temperaturas tales como la α-amilasa (*Sorghum bicolor*), almidón sintasa (*Glycine max*) y sacarosa sintasa (*Hordeum vulgare*) (Chang et al., 2010; Yang et al., 2011, Liu et al., 2012). Mientras que las proteínas involucradas en la glucólisis como alcohol deshidrogenasa (*Pisum sativum*) y la trioasa-fosfato isomerasa (*Acer platanoides*, *Fagus sylvatica, Glycine max, Camellia chinensis, Zea mays y Hordeum vulgare*) reducen su actividad al estar en condiciones de frío (Pawlowski, 2007, Chang et al., 2010; Lee et al., 2011). En el ciclo de Krebs sucede todo lo contrario, ya que la enzima encargada de sintetizar ATP (ATP sintasa) aumenta bajo estrés por frío para asegurar el suministro de energía en soya (Chang et al., 2010). Las peptidasas en condiciones de frío en semillas de soya, bajan su actividad enzimática. En plantas se han identificado cisteína proteasa (CPR) (*Arabidopsis* sp. *y Oryza sativa*) que a bajas temperaturas degradan globulinas (Rajjou et al., 2004; Kim et al., 2008).

Por otro lado, del total de proteínas expresadas, algunas podrían jugar un rol regulatorio en condiciones de frío, ya que el estrés por frío puede modificar el ADN por oxidación y/o ruptura (Kranner et al., 2010). Una de las enzimas afectada por el frío en Arabidopsis es la ADN ligasa (Waterworth et al., 2010). La fosfohidrolasa y la ARN polimerasa se ve afectada por el frío en maíz y soya, anulando la replicación de ácidos nucleicos e inhibiendo la división celular y, por ende, la germinación (Tan et al., 2013). En la Figura 11 se aprecia el total de proteínas ausentes y/o presentes durante la germinación en frío. El mapa de calor (Figura 11) representa la abundancia porcentual de cada proteína, donde se observa que 'Zafiro-INIA' presentó 117 proteínas que están ausentes en ´Oryzica 1`, algunas de las cuales podrían estar relacionadas con la tolerancia al frío y 119 proteínas compartidas entre ´Zafiro-INIA` y ´Oryzica 1`. Por otro lado, ´Oryzica 1` presentó 6 proteínas que no se observaron en ´Zafiro-INIA`.

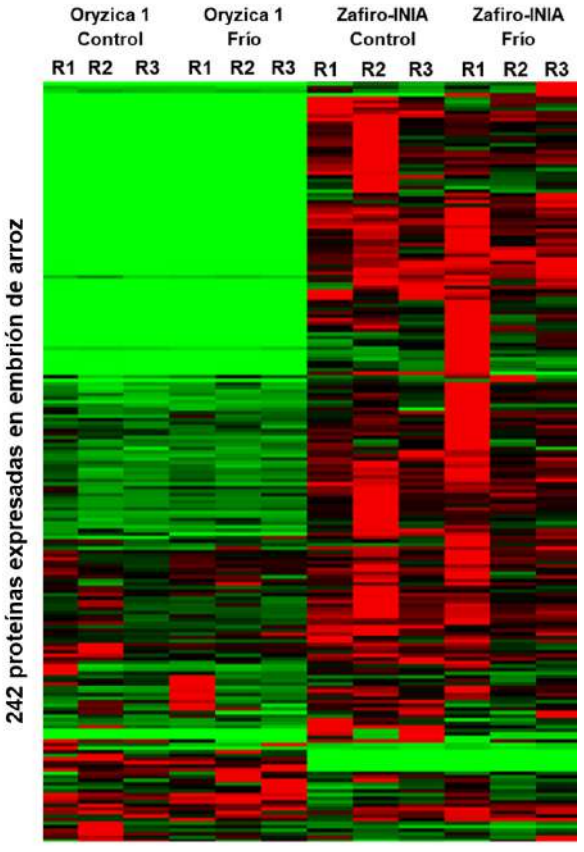


Figura 11. Mapa de calor del perfil proteico durante el proceso de germinación en ´Oryzica 1` y ´Zafiro-INIA`, en condiciones de control (28 °C) y condiciones de estrés (12 °C). Los colores diferentes corresponden a diferencias porcentuales de la abundancia relativa de cada proteína analizada. El color verde corresponde a ausencia (■) y el color rojo corresponde a 100% (■). R1a R3, corresponde a las repeticiones y las filas corresponden a las proteínas analizadas (Adaptado de González et al., 2013).

Dados los resultados obtenidos, es importante continuar con estos estudios relacionados con la caracterización e identificación de proteínas que desempeñan un rol importante en la protección de las plantas contra este estrés abiótico en arroz, ya que podrían permitir detectar posibles genes relacionados con tolerancia a frío en arroz en la etapa de germinación.

Tolerancia al frío en la etapa de plántula

En la etapa de plántula, la exposición a bajas temperaturas causa cambios fisiológicos en el cultivo (de los Reyes et al., 2003; Aghaee et al., 2011), como la disminución del contenido total de clorofila (Aghaee et al., 2011), la inhibición de la actividad fotosintética (Allen y Ort, 2001; Díaz et al., 2006; Suzuki et al., 2008) y el estrés oxidativo. Las bajas temperaturas en la etapa vegetativa afectan el vigor de las plántulas, lo que conduce a una longitud no uniforme de la planta (da Cruz et al., 2006). Además, hay lesiones irreversibles en las hojas, como necrosis, clorosis moteada (Suzuki et al., 2008, Ye et al., 2009) y clorosis (Andaya y Mackill, 2003). El daño en las hojas causado por bajas temperaturas en la etapa vegetativa puede evaluarse mediante una clasificación visual a través del sistema de evaluación SES para arroz, del Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI), la que ha sido ampliamente aceptada (da Cruz et al., 2013). Sin embargo, estas metodologías pueden tener algunas limitaciones porque dependen de la subjetividad del evaluador (Kim y Tai, 2011). En consecuencia, es necesario encontrar una metodología objetiva para las evaluaciones de tolerancia al frío en la etapa de plántula. Muchas investigaciones han demostrado diversos rasgos para evaluar la tolerancia al frío en el arroz en la etapa vegetativa. Por ejemplo, el contenido de clorofila es un buen estimador de la clorosis en la planta de arroz (Yoshida, 1981) y brinda una evaluación más precisa que el análisis visual (Park et al., 2013). Con respecto al daño por estrés por frío en las plantas, se han realizado algunas evaluaciones del daño oxidativo (Kim y Tai, 2011; Kim et al., 2012). El daño oxidativo puede evaluarse indirectamente mediante la medición del contenido de malondialdehído (MDA), que se considera un marcador de daño por frío (Campos et al., 2003; Kim y Tai, 2011). Otra herramienta ampliamente utilizada para medir la actividad fotosintética y la señal de estrés en las plantas es la fluorescencia de clorofila (Sikuku et al., 2010).

Con el fin de evaluar la tolerancia al frío se utilizó diferentes evaluaciones asociadas a la determinación de clorofila (Chl), fluorescencia de las clorofilas (Fv/Fm), clasificación visual (SES) y peroxidación lipídica (MDA) en 109 genotipos de arroz chileno, más la variedad de arroz colombiana ´Oryzica 1`, como control susceptible (Cabas, 2012). Las evaluaciones se realizaron después de someter a las plántulas al estrés de 5°C continuos por 72 h en oscuridad (Donoso et al., 2015). Los resultados se analizaron mediante análisis multivariado, una buena herramienta para identificar los genotipos de mejor rendimiento para la característica de interés (Bosetti et al., 2012), y BLUPs, que es un método de análisis estadístico para estimar efectos aleatorios basado modelos mixtos (Hill y Rosenberger, 1985; Piepho et al., 2008).

Los resultados mostraron un efecto visual importante en el tratamiento con bajas temperaturas, en donde el genotipo susceptible presentó un gran daño foliar (Foto 1). Al realizar un análisis de biplot se observa que la proyección opuesta de SES a Chl y Fv/Fm significa que las plantas con bajos niveles de clorosis foliar y peroxidación lipídica, tienen niveles altos de Chl y Fv/Fm (Figura 12). Este análisis muestra una correlación positiva entre Chl y Fv/Fm. Quila 260312, 241607, Quila 64117 y ´Oryzica 1` fueron los genotipos con la proyección más positiva en el primer componente principal y se ubicaron distantes de otros genotipos, siendo estos genotipos considerados susceptibles a las bajas temperaturas. Por el contrario, Quila 242002 y Quila 241304 fueron considerados tolerantes al frío porque se observaron opuestos a la evaluación SES y cerca del contenido de Chl en el biplot.

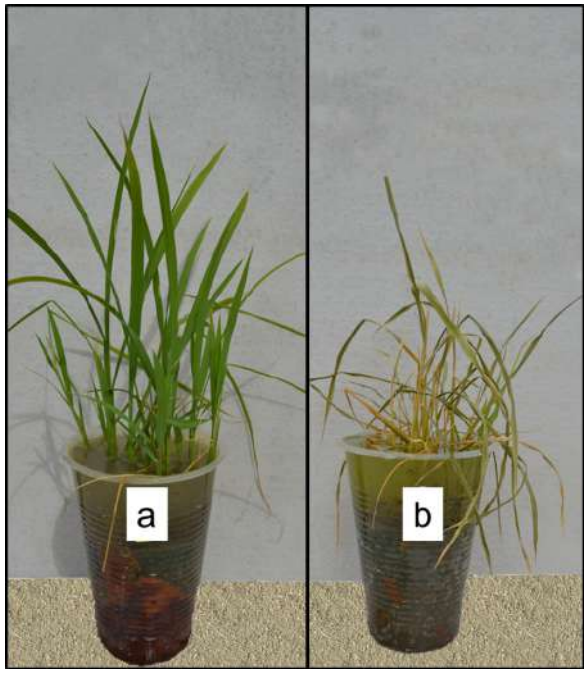


Foto 1. Aspecto visual de genotipos posterior a evaluación de tolerancia al frío. Genotipo tolerante (a) y genotipo susceptible, ´Oryzica 1` (b) (Adaptado de Donoso et al., 2015).

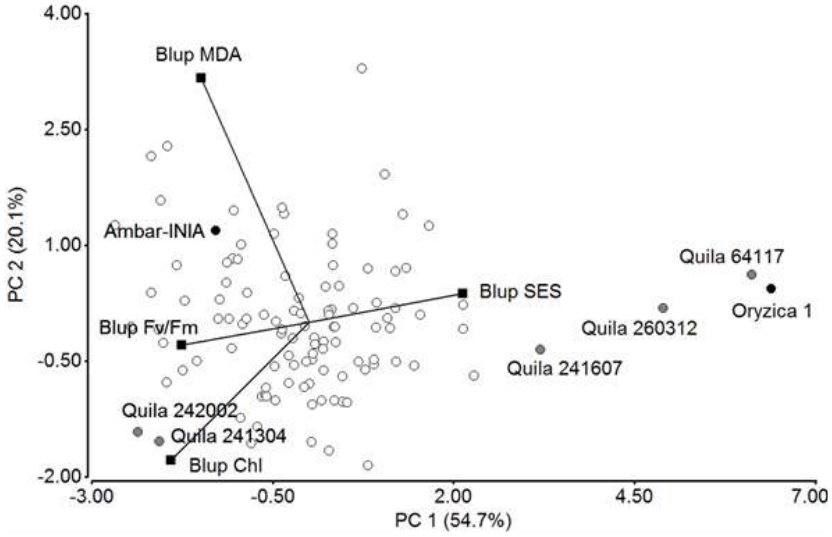


Figura 12. Biplot basado en BLUP de 4 rasgos estudiados en todos los genotipos. Los ejes X e Y muestran los componentes principales 1 y 2, respectivamente. Las líneas muestran BLUP para cada rasgo estudiado. Los círculos representan los genotipos del arroz (Adaptado de Donoso et al., 2015).

La evaluación de tolerancia al frío usando la escala SES, permitió encontrar genotipos con altos niveles de tolerancia al frío en plántula. Estudios similares de 4 ° C por 3 d, fueron suficientes para determinar genotipos tolerantes en esta etapa (Koseki et al., 2010). Por otro lado, altos niveles de Chl en líneas experimentales se pueden deber a una mejor respuesta de mecanismos de protección contra el daño por frío a través de carotenoides (Tambussi 2004; Huang y Guo, 2005) que reducen o evitan el estrés oxidativo y sus efectos negativos (Trebst, 2003). Además, bajos niveles de MDA en líneas experimentales pueden deberse a mayor presencia de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Foyer et al., 1997; Malecka et al., 2001; Kim y Tai, 2011).

Los resultados mostraron que el análisis de la peroxidación lipídica no se relacionó con el daño visual por frío. Además, clorofila se correlacionó negativamente con el daño visual por frío. La tolerancia al frío del 39 % de los genotipos evaluados, puede explicarse por la adaptación del arroz a las bajas temperaturas en Chile. Las líneas experimentales con alta tolerancia al frío tienen gran importancia para aumentar esta tolerancia en la etapa de plántula. Los genotipos con mayor tolerancia al frío fueron Quila 242002 y Quila 241304, mientras que los genotipos más susceptibles a bajas temperaturas fueron Quila 64117, Quila 260312 y 241607. Finalmente, se sugiere a las mediciones de SES y clorofila, como las metodologías más adecuadas para evaluar la tolerancia al frío en las plántulas de arroz para las condiciones de Chile.

Análisis de la expresión relativa de genes relacionados con la tolerancia al frío en la etapa de plántula

El arroz es una planta monocotiledónea modelo usada en estudios genéticos y moleculares (Jain et al., 2006a; Li et al., 2011). El éxito de los programas de secuenciación del genoma del arroz (Goff et al., 2002; Yu et al., 2002) ha permitido analizar la expresión de sus genes (Jain et al., 2006b; 2006c). A nivel fisiológico, el principal efecto inducido por las bajas temperaturas durante los estados tempranos de crecimiento vegetativo del arroz, está relacionado con la disminución de la fotosíntesis, causada por la inhibición del transporte de electrones a través del fotosistema II (PSII). Ello daña al PSII, debido a que el exceso de energía no puede ser usado, provocando un estrés oxidativo (Jeong et al., 2002; Nishiyama et al., 2006). Tal exceso de energía puede ser disipado vía ciclo de las xantófilas o por otros procesos fotosintéticos. En el caso de no ser disipada esta energía, se induce la generación de especies reactivas derivadas del oxígeno (ROS) que pueden causar daño oxidativo (Demmig-Adams y Adams., 1992). Las ROS son responsables de la peroxidación lipídica de los ácidos grasos poliinsaturados de la membrana celular (Bonnecarrère et al., 2011). La peroxidación lipídica puede ser evaluada indirectamente mediante la determinación de malondialdehido (MDA), el cual es considerado un marcador del daño ocasionado por frío (Kim y Tai, 2011), además de ser un buen índice de daño en la membrana celular (Zhang et al., 2009). Entre las ROS se incluyen los radicales superóxidos (O_2•), hidroxilo (OH•) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que se generan en todas las células aeróbicas durante los procesos metabólicos (Foyer et al., 1994, Asada, 1999). Éstos pueden reaccionar muy rápido con el ADN, clorofilas, lípidos y proteínas, y causar daño celular grave (Van Breusegem et al., 1999). Entre las enzimas antioxidantes que participan en la detoxificación selectiva está la Superóxido Dismutasa (SOD) que cataliza la transformación del superóxido en H_2O_2 y O_2, la Catalasa (CAT) y Glutatión Reductasa (GR) que convierten el H_2O_2 en agua, y la Ascorbato Peroxidasa (APX) que elimina el H_2O_2 vía ciclo ascorbato-GSH (Saruyama y Tanida, 1995; Hammond-Kosack y Jones, 1996; Huang y Guo, 2005; Ahmad et al., 2008).

La tolerancia a las bajas temperaturas es una característica dependiente del genotipo, que es controlada por más de un gen (Baruah et al., 2009). Se ha demostrado que la tolerancia a algunos estreses abióticos está asociada con una mayor capacidad para eliminar o desintoxicar las ROS (Malan et al., 1990). Una evaluación realizada en INIA utilizó la línea experimental chilena Quila

241701 y los cultivares ´Diamante-INIA`, ´Zafiro-INIA` y ´Susan` (Donoso et al., 2014). Como testigo susceptible al frío se utilizó la variedad ´Oryzica 1`, utilizada por el CIAT (Colombia). Las plantas crecieron en un invernadero con un fotoperíodo de 14 h de luz y 10 h de oscuridad, iluminadas con luz artificial utilizando lámparas de haluro metálico con una radiación de 300 µmol de fotones $m^{-2}s^{-1}$, una temperatura de 28 °C y una humedad relativa de 60 %. Cuando las plántulas poseían 3 a 4 hojas extendidas, fueron tratadas a 5 °C en una cámara de frío en oscuridad (Baruah et al., 2009) por 72 h. La peroxidación lipídica se determinó utilizando el protocolo descrito por Dionisio-Sese y Tobita (1998) modificado, el cual tiene como propósito principal medir la concentración de malondialdehido (MDA).

Los resultados de las concentraciones de MDA para determinar peroxidación lipídica mostraron valores entre 2,94 y 5,57 nmol g^{-1} de peso fresco en los genotipos arroz analizados. Esto coincide con lo obtenido por Cabas (2012) que, al realizar análisis de peroxidación lipídica en distintos genotipos de arroz, obtuvo valores que mostraron variaciones entre 1,39 hasta 5,56 nmol g^{-1} de peso fresco (PF). Realizado el análisis de varianza y utilizando el test de LSD Fisher, se determinó que la concentración de MDA en las plántulas del genotipo susceptible ´Oryzica 1` después de ser sometido a estrés por frío a 5 °C por 3 d fue diferente ($P \leq 0,05$). El contenido de MDA fue 1,86 veces mayor que en el genotipo ´Susan` y 1,37 veces mayor que en el genotipo ´Diamante-INIA`. En comparación con su control sin tratamiento de frío, fue 1,71 veces mayor y con el resto de los genotipos no existieron diferencias significativas. También se observó que el genotipo ´Diamante-INIA`, sometido a tratamiento por frío, contenía 1,28 veces más MDA que en su control y en los genotipos Quila 241701, ´Susan` y ´Zafiro-INIA` no se encontraron diferencias significativas en el contenido de MDA entre las plántulas que fueron sometidas a estrés por frío con la planta control (Figura 13). Esto también fue observado por Kim y Tai (2011), quienes igualmente encontraron incrementos significativos en los niveles de MDA entre plántulas de arroz tolerante y susceptible al frío, al someterlas a condiciones de 9 °C por 14 d.

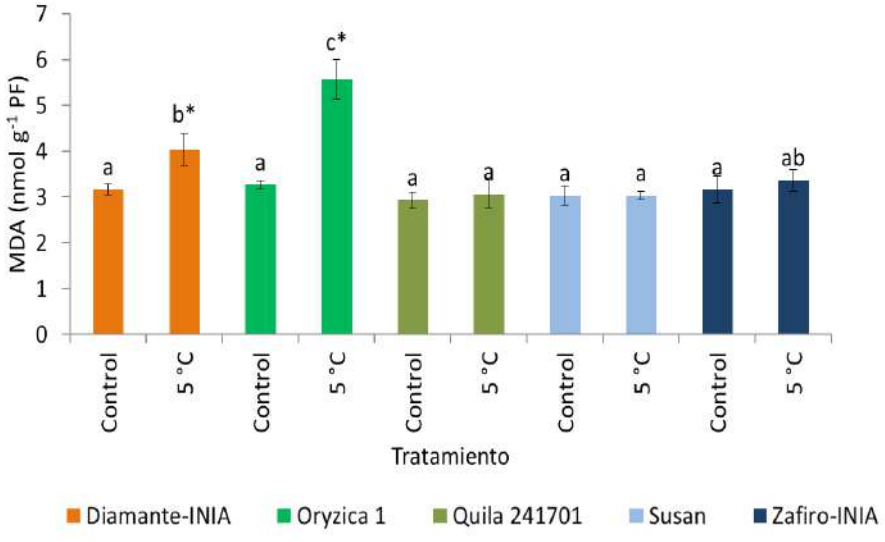


Figura 13. Contenido de MDA en plántulas de arroz sensible y tolerantes al frío, posterior al tratamiento de frío. (*) Indica diferencias significativas dentro de cada genotipo y letras diferentes indican diferencias entre genotipos, según test de LSD Fisher ($P \leq 0,05$). La barra de error corresponde al error estándar de 3 repeticiones (Adaptado de Donoso et al., 2014).

Los resultados coinciden con lo observado por Wang et al. (2013), quienes sometieron plántulas de genotipos de arroz susceptible y tolerantes al frío a un tratamiento de frío de 5 °C durante 3 d y observaron que los mayores niveles de MDA lo poseían los genotipos susceptibles. Lo anterior indica que, probablemente, el tratamiento con bajas temperaturas afectó mayormente a las plántulas de los genotipos ´Oryzica 1` y ´Diamante-INIA`. La peroxidación lipídica es un buen marcador bioquímico de lesiones mediadas por radicales libres en la membrana lipídica (Verma y Dubey, 2003). De acuerdo con Yun et al. (2010), esto permite señalar que ´Oryzica 1` podría estar sufriendo un mayor daño oxidativo, mientras que los demás genotipos tendrían un menor daño oxidativo.

Posteriormente se realizó un análisis de PCR en tiempo real para detectar niveles de expresión de las enzimas SOD, GR y CAT. En él se determinó diferencias significativas en el nivel de expresión de la enzima SOD en el genotipo ´Susan`. Esto fue 2,7 veces mayor que en el genotipo Quila 241701, no existiendo diferencias significativas con el resto de los genotipos. En la expresión relativa de la enzima GR no se observaron diferencias significativas entre los genotipos. Respecto al análisis de la expresión relativa de CAT, se observó un incremento significativo en el cultivar ´Oryzica 1` el cual fue de 4 a 10 veces mayor que en el resto de los genotipos. Wang et al. (2013), analizaron estas enzimas para genotipos de arroz tolerantes y susceptibles al frío al estado de plántula, sometidas a estrés por frío y observaron un aumento significativo en la actividad de las enzimas SOD y GR en los genotipos tolerantes al frío. De acuerdo con otras investigaciones, la disminución de la peroxidación lipídica en plantas de arroz aclimatadas al frío se debe al aumento del sistema de defensa antioxidante, en el que durante o después del frío incrementa la actividad de la SOD, GR y CAT (Prasad, 1996; Kuk et al., 2003), enzimas que forman parte del sistema antioxidante (Moradi y Ismail, 2007).

Lo resultados obtenidos no coinciden con lo mencionado hasta ahora en la literatura, donde se indica que niveles altos de esta enzima disminuyen el nivel de estrés oxidativo en plantas (Saruyama y Tanida, 1995; Hammond-Kosack y Jones, 1996; Huang y Guo, 2005; Ahmad et al., 2008). La expresión relativa de la enzima CAT en el genotipo susceptible ´Oryzica 1`, se puede relacionar con su rol en la transformación de H_2O_2 en oxígeno molecular y H_2O. Su incremento pudo deberse a que este genotipo, por presentar un alto nivel de MDA luego del tratamiento por frío, debía eliminar el exceso de H_2O_2 producido durante el metabolismo celular, evitando, de este modo, su acumulación y consiguiente daño celular. Existen varios mecanismos establecidos que conducen a la reducción o la prevención del estrés oxidativo y sus efectos dañinos (Bonnecarrère et al., 2011). La primera barrera es impedir la formación de ROS, disipando el exceso de energía mediante el ciclo de las xantofilas que implica la síntesis de zeatina (Z) y anteraxantina (A) a partir de la violaxantina (V) (Demmig-Adams y Adams, 1992).

Una segunda barrera consiste en la desintoxicación de ROS por los carotenoides o por la acción de enzimas antioxidantes como las analizadas en este estudio, entre otras (Saruyama y Tanida, 1995, Huang y Guo, 2005). También los carotenoides, como la luteína y neoxantina, se han asociado con los procesos de eliminación de ROS (Dall'Osto et al., 2007). Otros estudios han comparado la contribución de detoxificación enzimática y no enzimática de ROS en genotipos susceptibles al frío (*Oryza sativa* var. *indica*) y tolerante al frío (*Oryza sativa* var. *japonica*), y han tratado de correlacionar estas actividades con las respectivas capacidades de tolerar el frío por estas plantas (Saruyama y Tanida, 1995; Huang y Guo, 2005; Morsy et al., 2007). Sin embargo, existen resultados contradictorios relacionados con enzimas que aumentan o disminuyen su actividad cuando las plantas han crecido bajo estrés por frío (Bonecarreré et al., 2011). Por ello, las diferencias observadas en los niveles de expresión de las enzimas antioxidantes estudiadas, pueden deberse a diversos mecanismos presentes en los genotipos estudiados y no necesariamente a un único mecanismo de tolerancia al frío.

Tolerancia al frío en la etapa reproductiva

La evaluación de la tolerancia al frío es difícil de realizar, tanto en condiciones de campo como controladas. El principal problema asociado a las evaluaciones de campo es la incertidumbre en el estrés por frío sufrido por la planta, debido a la falta de control sobre la duración, la intensidad del estrés y otros factores ambientales. En este contexto, un estudio realizado en dos temporadas en condiciones de campo en Chile (2003/2004 y 2004/2005), demostró que bajas temperaturas del aire y del agua, influyen negativamente en los rendimientos (Ortega, 2007). Por este motivo, el uso del agua puede tener un rol protector de las bajas temperaturas, solamente cuando ésta tiene la temperatura adecuada durante la etapa reproductiva.

El principal problema de las evaluaciones en condiciones controladas es que diferentes experimentos pueden resultar en diferentes órdenes de tolerancia al frío entre genotipos (Mackill y Lei, 1997). Sin embargo, la evaluación en condiciones controladas, es una forma aproximada y efectiva de hacer la selección por esta característica, como lo afirman Da Cruz et al. (2006), Andaya y Mackill (2003), quienes recomiendan este tipo de evaluaciones como la mejor opción para la evaluación del efecto de las bajas temperaturas.

En Chile, en condiciones controladas, se ha estudiado el efecto de las bajas temperaturas en el desarrollo del polen en el cultivo del arroz, a 16 °C entre inicio de formación de panícula y hasta la antesis (Fuentealba et al., 2014). Los resultados mostraron que las bajas temperaturas inducen hipertrofia del tapete, lóculos atrofiados, granos malformados y un retraso de la antesis con una disminución en la viabilidad del polen (< 68 %) y germinación del polen (< 55 %). Dentro del estudio se encontró que la variedad más susceptible a las bajas temperaturas fue Diamante-INIA y la variedad con menos efectos negativos en esta etapa del desarrollo fue Zafiro-INIA.

Otros estudios realizados en la etapa reproductiva (bota y floración), determinaron una relación lineal positiva entre la acumulación de temperatura (base 15 °C) 2 d antes y 2 d después de la floración, con el porcentaje de esterilidad en ´Ñiquén-INIA` y ´Diamante-INIA` durante el período de floración. La variedad ´Quella-INIA` mostró una mayor relación positiva entre la temperatura y la etapa de término de bota (embuchamiento), probablemente asociado a la meiosis, lo que indicó una respuesta genotípica a las bajas temperaturas durante la fase reproductiva (Alvarado y Grau, 1991). Finalmente, es importante destacar que la tolerancia a frío en la etapa vegetativa y reproductiva responde a un control genético diferente. Por lo tanto, la selección a tolerancia a frío de estas etapas debe realizarse en forma separada (Alvarado y Grau, 1991). Posteriormente, este trabajo de selección de genotipos tolerantes a bajas temperaturas se continuó con la evaluación de genotipos provenientes de ensayos internacionales del CIAT e IRRI, y el desarrollo de poblaciones específicas tolerantes a frío a través del convenio INIA-CIAT. En general, todos los genotipos evaluados fueron susceptibles al frío y sólo se logró seleccionar un escaso número de ellos. Sin embargo, los genotipos tolerantes a frío seleccionados presentaron problemas de calidad de grano y bajo rendimiento, comparados con las variedades comerciales (Alvarado y Grau, 1991).

Para realizar tratamientos de tolerancia a frío en etapa reproductiva, se analizó previamente la fenología del grano de polen en 10 genotipos de arroz en Chile. Para ello se estudió la distancia auricular, el largo de la espiguilla y el diámetro del grano de polen en las variedades ´Diamante-INIA`, ´Zafiro-INIA`, ´Brillante-INIA`, ´Ámbar-INIA`, ´Buli-INIA`, ´Oro`, ´Ranballi`, ´Susan`, ´Corea 2` y ´Guara`. Los genotipos de arroz fueron crecidos en condiciones controladas, con una intensidad lumínica entre 200 y 400 µmoles de fotones m^{-2} s^{-1} y una temperatura máxima de 28 °C en el día y mínima de 22 °C en la noche. Después de 120 d se comenzó con la cosecha de espiguillas con diferentes estados de desarrollo del grano de polen, eligiendo distancias auriculares contrastantes. Para el estudio se asumió que el diámetro del grano de polen depende directamente de su fenología, donde diámetros de granos de polen mayores corresponden a estados fenológicos más maduros y diámetros menores corresponden a estados fenológicos inmaduros (tétrada)

(Raghavan, 1988). Para la determinación del estado de tétrada, tres espiguillas fueron removidas de la panícula y posteriormente fueron maceradas. El tejido macerado fue teñido utilizando Azul de Coomassie por 10 min. Posteriormente se buscó la presencia de granos de polen al estado de tétrada bajo el microscopio. En todos los casos se registró la distancia auricular y el tamaño de la espiguilla. Además, se fotografió el polen teñido, para posterior análisis de su tamaño mediante el software Image J (Schneider et al., 2012).

La tolerancia al frío se determinó en 145 genotipos del banco de germoplasma de INIA Quilamapu. Dentro de estos genotipos figuran cuatro variedades utilizadas en Chile por el sector arrocero (´Diamante-INIA`, ´Oro`, ´Brillante-INIA` y ´Zafiro-INIA`). El testigo tolerante utilizado fue ´Susan`, mientras que el testigo susceptible fue Quila 225101. Estos genotipos fueron pregerminados en invernadero y, posteriormente, trasplantados cuando alcanzaron la 3ra a 4ta hoja verdadera. Todo esto se llevó a cabo en una casa de malla con 36 % de reducción de luz. Las macetas se mantuvieron con una lámina de agua de 10 cm hasta el estado de microsporogénesis. El estado de microspora se determinó midiendo la distancia auricular, previa comprobación del estado de desarrollo mediante microscopía. En este estado las plantas fueron tratadas a una temperatura de 5 °C por 24 h, condición dada en cámara de frío en oscuridad y sin la lámina de agua para evitar el efecto amortiguador del agua. Después de este estrés, las plantas fueron regresadas a la casa malla en las mismas condiciones en que se encontraban previamente, para analizar su recuperación. Las evaluaciones fueron realizadas en base al promedio del peso de los granos de tres panículas por maceta, de plantas tratadas por frío cuyo valor fue dividido por el promedio del peso de los granos de tres panículas de su control sin estrés. Por otro lado, utilizando los mismos valores del peso promedio de tres panículas por maceta, la tolerancia al frío fue calculada mediante un índice de Duque y Cruz (Cruz, 2010).

Este índice es calculado multiplicando el ´índice combinado de tolerancia a frío`, con la ´capacidad productiva` de cada genotipo en evaluación. El ´índice combinado de la tolerancia al frío` es la razón entre la ´tolerancia al frío del genotipo de interés` y la ´tolerancia al frío del genotipo testigo tolerante`. A su vez la tolerancia al frío de cada genotipo se evalúa mediante la razón entre el ´peso de los granos llenos del genotipo en frío` y el ´peso de los granos llenos del mismo genotipo en condiciones normales`. Finalmente, la ´capacidad productiva` corresponde a la razón entre el ´peso de los granos llenos del genotipo en evaluación` y el ´peso promedio de los granos llenos del genotipo testigo`.

Este índice permite combinar el efecto de las bajas temperaturas con el rendimiento en condiciones normales. Además, permite comparar la tolerancia del genotipo de interés, con los testigos tolerantes sometidos, también, a condiciones normales y de bajas temperaturas.

En el estudio se determinó que la medición de la distancia auricular, a diferencia del tamaño de la espiguilla, fue la mejor correlacionada con el estado del desarrollo del polen. Los rangos evaluados de diámetro de polen, largo de espiguilla y distancia auricular fueron 3-18 µm, 4-12 mm y -13 a 22 cm, respectivamente. Se observó una baja correlación entre el largo de la espiguilla y el diámetro del grano del polen (correlación de Pearson r=0.45; P<0.0001) (Figura 14) y una alta correlación entre la distancia auricular y el diámetro del grano del polen (correlación de Pearson r=0.74; P<0.0001) (Figura 15). En el caso de la distancia auricular se determinó que, en la mayoría de los casos, el estado de tétrada se encuentra entre una distancia auricular de -15 cm a 0. Este rango de distancias auriculares fue utilizado para la realización de los tratamientos posteriores, lo cual fue verificado utilizando microscopía.

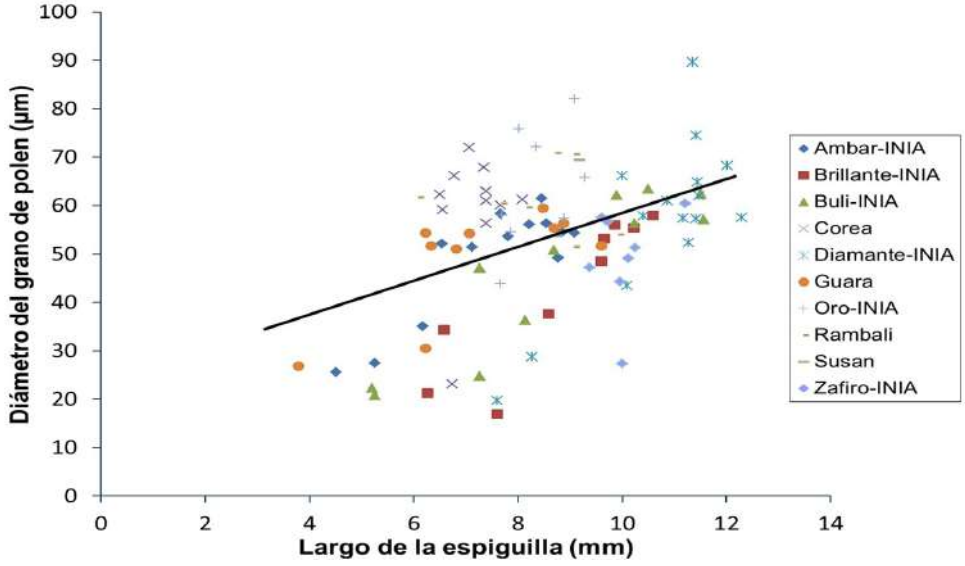


Figura 14. Relación entre el largo de la espiguilla de 10 genotipos y el diámetro del grano de polen. Cada figura dentro del gráfico representa un dato del largo de la espiguilla versus su respectivo diámetro del grano de polen. La línea recta corresponde a la tendencia entre las variables medidas (Adaptado de Donoso et al., 2013b).

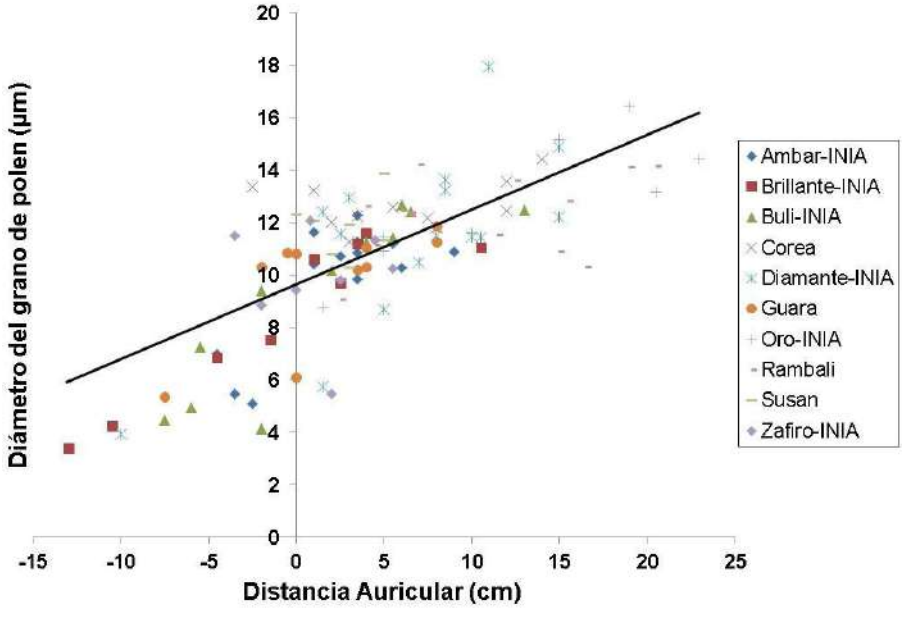


Figura 15. Relación entre la distancia auricular de 10 genotipos y el diámetro del grano de polen. Cada figura dentro del gráfico representa un dato de distancia auricular versus su respectivo diámetro del grano de polen. La línea recta corresponde a la tendencia entre las variables medidas (Adaptado de Donoso et al., 2013b).

Con posterioridad al tratamiento de bajas temperaturas, los genotipos se ordenaron de menor a mayor según el índice de tolerancia antes mencionado (Cruz, 2010). Los valores fluctuaron entre 0,38 y 1,57, con un valor medio de 0,78 (Figura 16). Los genotipos que se encontraban sobre y cercanos a este valor se consideraron como tolerantes a las bajas temperaturas. Las variedades chilenas ´Zafiro-INIA`, ´Ámbar-INIA`, ´Diamante-INIA`, ´Oro` y ´Brillante-INIA` se ubicaron por sobre la mitad del ranking, siendo la más tolerante la variedad ´Brillante-INIA` y la menos tolerante ´Zafiro-INIA`. El genotipo ´Susan` también se ubicó por encima de la mitad de esta gráfica.

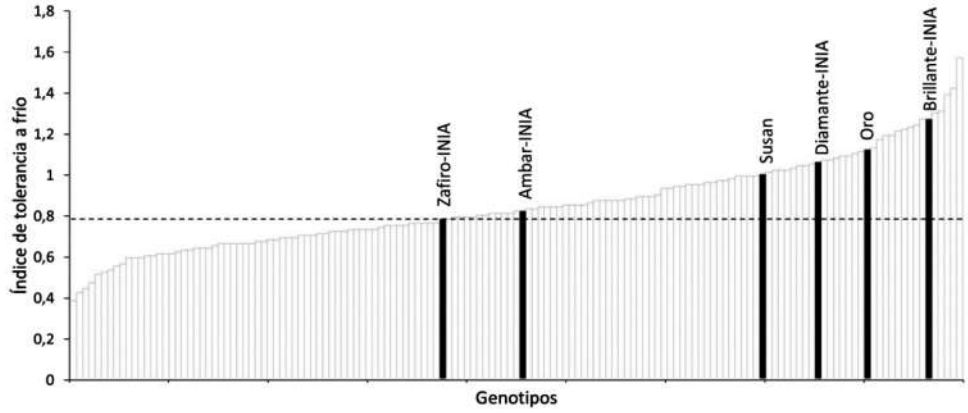


Figura 16. Ranking de tolerancia al frío en etapa reproductiva, en base a evaluación de índice de tolerancia. La línea punteada corresponde al valor medio de la evaluación (0,78). Las barras en color negro corresponden a las variedades nacionales, y el testigo ´Susan`.

También se graficaron las medias del peso porcentual de la panícula (genotipo tratado a 5 °C * 100/ genotipo sin tratar), los cuales fueron ordenados de menor a mayor peso porcentual de la panícula (Figura 17). Los porcentajes fluctuaron entre 29,8 % a 131,2 %, siendo la mitad del ranking el valor 65,6 %. Las variedades ´Oro`, ´Ámbar-INIA` y ´Diamante-INIA` y ´Brillante-INIA` se ubicaron por sobre la mitad de éste, al igual que el testigo ´Susan` mientras que la variedad ´Zafiro-INIA` se ubicó bajo esta mitad. La variedad de menor tolerancia fue ´Zafiro-INIA` y la más tolerante ´Brillante-INIA`.

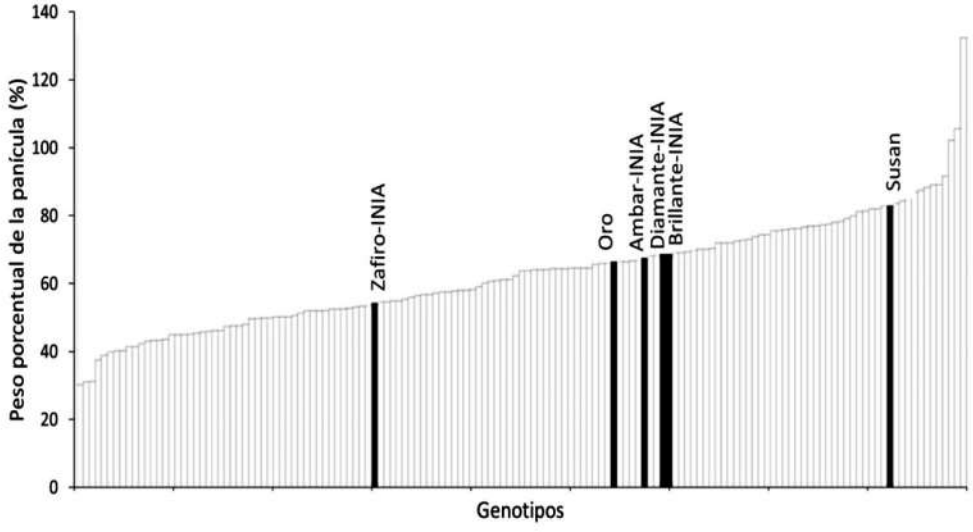


Figura 17. Ranking de tolerancia al frío en etapa reproductiva, en base al peso porcentual de la panícula. En color negro, se destacan las variedades nacionales y el testigo ´Susan`.

Los genotipos con mayor tolerancia a frío fueron Quilla 233008, Quilla 154601, Quilla 159005, RQuilla 418, Quilla 251702, Quilla 251301 y RQuilla 397 (Cuadro 1). Estos genotipos están ordenados de menor a mayor tolerancia al frío en la etapa reproductiva. La variedad ´Susan` se ubicó bajo estos genotipos seleccionados, al igual que la mayoría de las variedades chilenas, a excepción de 'Brillante-INIA' que se ubicó a la misma altura que los genotipos tolerantes antes mencionados.

Cuadro 1. Tolerancia al frío en etapa reproductiva en base a índice de tolerancia.

GENOTIPOS	Medias		GENOTIPOS	Medias		GENOTIPOS	Medias		GENOTIPOS	Medias		GENOTIPOS	Medias	
Quilla 225101	0,38	a	Quila 241321	0,66	a-g	Quilla 256903	0,76	b-j	Quila 240203	0,87	d-m	RQuilla 419	1,02	g-r
Quilla 225001	0,42	ab	Quilla 242104	0,67	a-g	Quilla 234801	0,76	b-j	Quilla 225105	0,87	d-m	Quilla 243201	1,03	g-r
Rquilla 391	0,44	ab	Rquilla 392	0,67	a-g	Zafiro-INIA	0,78	b-j	RQuilla 384	0,87	d-m	Quilla 260410	1,04	g-s
Quilla 230513	0,47	a-c	Quilla 241402	0,68	a-g	Quilla 256902	0,78	b-j	Quilla 256605	0,88	d-n	Quilla 262801	1,04	g-s
Quilla 235207	0,51	a-d	Quilla 242504	0,68	a-g	Quilla 216305	0,79	b-j	Quila 154907	0,88	d-n	Quila 154905	1,05	g-s
Quila 241313	0,52	a-d	Quilla 241610	0,69	a-h	Sandora	0,79	b-j	Quilla 252702	0,89	d-o	Diamante-INIA	1,06	g-s
Rquilla 403	0,53	a-e	Quilla 139103	0,69	a-h	Quilla 66304	0,79	b-j	Quila 260312	0,89	e-o	Quila 238908	1,07	g-s
Rquilla 423	0,55	a-e	Quilla 254102	0,69	a-h	Quila 241607	0,79	b-j	Quilla 242701	0,89	e-o	Quilla 157302	1,07	h-s
Rquilla 389	0,56	a-e	Quilla 249501	0,7	a-h	Quilla 242114	0,8	b-j	Quilla 249103	0,9	e-o	Quilla 256701	1,08	h-s
Quilla 257501	0,59	a-f	Quilla 260331	0,7	a-h	Quilla 228603	0,8	b-j	Quilla 244501	0,93	e-o	Quilla 260408	1,09	h-s
Quilla 230603	0,59	a-f	Quila 262102	0,7	a-h	Quila 225102	0,81	b-k	Quilla 249304	0,93	e-o	Quilla 245801	1,09	h-s
Quilla 243901	0,59	a-f	Quilla 156603	0,71	a-h	Quilla 240204	0,81	b-k	Quilla 260405	0,94	e-p	Quila 241403	1,1	h-s
Quilla 246901	0,6	a-f	Quilla 221801	0,71	a-h	Quilla 251703	0,81	b-k	Quilla 233201	0,94	e-p	Quilla 241608	1,11	h-s
Quila 241315	0,6	a-f	Ranballi	0,72	a-h	Quilla 222704	0,81	b-k	Quila 240208	0,95	e-p	Oro	1,12	i-s
Quila 262003	0,61	a-f	Quilla 213801	0,72	a-h	Quilla 256104	0,82	b-l	RQuilla 420	0,95	e-q	Quilla 244012	1,13	j-s
Quilla 242118	0,61	a-f	Quila 262103	0,72	a-h	Ambar-INIA	0,82	b-l	Quilla 252701	0,95	f-q	Quilla 262601	1,17	k-s
Quilla 241309	0,61	a-f	Quilla 257502	0,73	a-h	Quilla 257003	0,83	c-l	Quila 176101	0,96	f-q	RQuilla 425	1,19	k-t
Quilla 242415	0,62	a-f	Quila 261601	0,73	a-h	Quila 240201	0,83	c-l	Quilla 256604	0,96	f-q	Quila 241304	1,19	k-t
Quilla 242012	0,63	a-g	Quilla 230601	0,73	a-h	Quilla 260309	0,84	d-l	Quilla 253701	0,97	f-q	Quilla 230602	1,21	l-t
Quila 261801	0,63	a-g	Quilla 256401	0,73	a-h	Quila 240102	0,84	d-l	Quila 240103	0,97	f-q	Quila 261803	1,22	l-t
Quilla 243102	0,64	a-g	Quilla 260414	0,73	a-h	RQuilla 422	0,84	d-l	Quilla 238803	0,98	f-q	Quilla 256402	1,23	m-t
Quila 241605	0,64	a-g	Quilla 220001	0,74	a-h	RQuilla 424	0,84	d-l	Quila 241305	0,99	f-q	Quilla 233008	1,24	n-t
Quilla 237908	0,64	a-g	Quilla 231902	0,75	a-h	Quilla 242006	0,85	d-l	Quilla 251302	0,99	f-r	Quilla 154601	1,27	o-t
Quilla 185007	0,65	a-g	Quilla 256101	0,75	a-h	Quilla 242617	0,85	d-l	Quila 262104	0,99	g-r	Brillante-INIA	1,27	o-t
Quilla 256801	0,66	a-g	Quilla 173201	0,75	a-h	Quila 241606	0,85	d-l	RQuilla 412	0,99	g-r	Quilla 159005	1,3	p-t
Quilla 249305	0,66	a-g	Quilla 154804	0,75	a-h	Rquilla 205	0,85	d-l	Susan	1	g-r	RQuilla 418	1,31	q-t
Quilla 242003	0,66	a-g	Quilla 242206	0,76	a-i	RQuilla 415	0,86	d-l	Quilla 244104	1,01	g-r	Quilla 251702	1,39	r-t
Quilla 260412	0,66	a-g	Quila 262101	0,76	a-j	RQuilla 421	0,87	d-m	Quilla 249005	1,02	g-r	Quilla 251301	1,42	st
Quilla 225103	0,66	a-g	Quilla 67201	0,76	b-j	Quilla 243304	0,87	d-m	Quilla 243306	1,02	g-r	RQuilla 397	1,57	t

El análisis estadístico corresponde a una ANOVA. Letras diferentes corresponden a medias distintas (LSD Fisher; $P < 0,05$).

Por otra parte, al tabular las medias del peso porcentual de la panícula y seleccionar los siete mejores genotipos, se obtiene que Quilla 243306, Quilla 159005, Quilla 242114, Quilla 23008, RQuilla 418, Quilla 249304 y Quilla 230602 poseen un mayor peso porcentual, dejando por debajo a las variedades chilenas y al testigo tolerante (Cuadro 2). Respecto a la determinación de la fenología del polen, otros estudios coinciden en el uso de la distancia auricular. Sin embargo, han encontrado intervalos diferentes de distancia auricular, donde el estado de tétrada se ubicó entre -3 y +10 (da Cruz et al., 2006). Tales resultados pueden deberse a las diferencias en la fenología de los genotipos analizados en este estudio, que son de origen *japonico* templado, a diferencia del origen subtropical de la mitad los genotipos evaluados en la publicación antes citada. La clasificación de ´Diamante-INIA` dentro del grupo de genotipos con mayor tolerancia al frío habría sido reportada en estudios similares, en que el cultivar presenta bajos niveles de esterilidad floral posterior a tratamientos con bajas temperaturas (da Cruz et al., 2006). La variable frecuentemente utilizada para la evaluación del frío en floración, es el porcentaje de esterilidad o de fertilidad. Sin embargo, en este trabajo se usó el índice de Duque y Cruz (Cruz, 2010) que, además de tener alta correlación con el porcentaje de esterilidad, evita errores de interpretación. La alta correlación entre las variables permite la selección por caracteres de fácil medición como el índice basado en el peso de granos llenos. Este análisis permite seleccionar los genotipos

como donantes de tolerancia al frío, donantes de mayor peso de grano o la combinación de los dos. El índice de Duque y Cruz (Cruz, 2010) combina la reacción al frío con un componente de rendimiento en condiciones normales. Por lo tanto, aquellos genotipos con iguales o mayores índices de tolerancia al de los testigos tolerantes, pueden ser considerados como tolerantes y serán donantes potenciales de esta característica. Finalmente, el estudio de la tolerancia al frío en diferentes genotipos de arroz de clima templado en la etapa reproductiva, permite concluir que el estado de tétrada se puede identificar mediante la medición de la distancia auricular en los diferentes genotipos estudiados. Además, Quilla 230602 se eligió como testigo de tolerancia al frío, debido a que obtuvo los mejores niveles de tolerancia al frío en base a los dos índices de tolerancia en la etapa reproductiva, superiores a los cultivares comerciales presentes en Chile.

Cuadro 2. Tolerancia al frío en etapa reproductiva en base al peso porcentual de la panícula.

Genotipos	Medias		Genotipos	Medias		Genotipos	Medias		Genotipos	Medias		Genotipos	Medias	
Quilla 241610	29,8	A	Quilla 154804	49,23	A-Q	Quilla 235207	56,73	A-X	Oro	65,7	C-X	Quila 154907	75,4	H-Z
Quilla 252702	30,53	AB	Quilla 242003	49,4	A-Q	Sandora	56,8	A-X	Quilla 252701	65,77	C-X	Quila 241607	75,53	H-Z
Rquilla 403	30,8	A-C	Equilla 415	49,47	A-Q	Rquilla 205	56,97	A-X	Quila 240103	65,8	C-X	Quilla 243201	75,83	H-Z
Quilla 156603	37,03	A-D	Quilla 242617	49,6	A-Q	Quilla 256605	57,1	A-X	Quilla 220001	66,07	D-X	Rquilla 397	76,23	I-Z
Quilla 230513	38,53	A-E	Quila 241605	49,67	A-Q	Quilla 240204	57,53	A-X	Quila 240102	66,17	D-Y	Quila 261803	76,3	I-Z
Quilla 225101	39,3	A-F	Quilla 173201	49,7	A-Q	Quilla 256101	57,53	A-X	Ambar-INIA	66,93	D-Y	Quila 262102	76,4	I-Z
Quilla 249305	39,63	A-G	Quila 238908	50	A-Q	Quilla 66304	57,8	A-X	Quilla 242701	67,4	D-Y	Quila 154905	76,67	I-Z
Quilla 243102	39,7	A-G	Quilla 256401	50,77	A-R	Quilla 256104	58,4	A-X	Quila 260312	67,63	D-Y	Rquilla 419	77,3	J-Z
Quilla 241402	40,87	A-H	Quilla 243304	51,4	A-S	Quilla 260414	59,47	A-X	Diamante-INIA	67,93	D-Y	Quilla 262601	77,47	J-Z
Quilla 246901	41	A-H	Quila 241313	51,43	A-S	Quilla 260331	60,1	A-X	Brillante-INIA	68,03	D-Y	Rquilla 422	78,3	K-Z
Rquilla 391	41,7	A-I	Ranballi	51,5	A-S	Quila 241606	60,3	A-X	Quilla 260412	68,3	D-Y	Quila 241304	79,2	K-Z
Quilla 216305	42,47	A-J	Quilla 237908	51,53	A-T	Quilla 242206	60,53	A-X	Quila 262003	68,43	D-Y	Quila 261801	80,47	L-Z
Quilla 242012	42,83	A-J	Quilla 221801	51,9	A-T	Quilla 234801	60,57	A-X	Quilla 233201	68,73	D-Y	Rquilla 425	80,63	M-Z
Quilla 251302	42,87	A-J	Quilla 225103	51,9	A-T	Quilla 257502	61,53	A-X	Quilla 242504	69,27	D-Y	Quilla 257003	81,13	N-Z
Quilla 185007	43,1	A-J	Quilla 225105	52	A-T	Rquilla 424	63,07	A-X	Quila 176101	69,43	D-Y	Quila 240201	81,17	N-Z
Quila 262103	44,37	A-K	Quilla 260410	52,3	A-T	Quilla 230601	63,07	A-X	Rquilla 421	69,47	D-Y	Quilla 251702	81,9	N-Z
Quilla 243901	44,37	A-K	Quilla 241309	52,47	A-U	Quilla 256701	63,3	A-X	Quila 225102	69,6	D-Z	Susan	82,17	O-Z
Quila 238803	44,5	A-K	Quilla 251703	52,7	A-U	Quilla 256903	63,47	A-X	Rquilla 423	71,2	D-Z	Quila 262104	82,67	P-Z
Quila 262101	44,63	A-K	Quilla 230603	52,87	A-U	Quilla 260309	63,5	A-X	Quila 241403	71,27	D-Z	Quila 261601	83,5	Q-Z
Quilla 242006	44,83	A-K	Zafiro-INIA	53,63	A-W	Quilla 231902	63,63	A-X	Rquilla 412	71,27	D-Z	Quilla 251301	85,77	R-Z
Quila 241315	45,17	A-K	Quilla 249103	54,03	A-W	Quila 240208	63,67	A-X	Quilla 253701	71,67	D-Z	Quilla 157302	86,03	S-Z
Quilla 225001	45,33	A-L	Quilla 244012	54,07	A-W	Quilla 242415	63,7	A-X	Quilla 256902	71,97	D-Z	Quila 240203	86,67	T-Z
Quilla 260408	45,7	A-M	Quilla 249501	54,23	A-W	Quilla 228603	63,87	A-X	Quila 241321	72,2	E-Z	Quilla 243306	87,47	U-Z
Rquilla 420	45,83	A-M	Quilla 242104	54,27	A-W	Quilla 242118	63,97	A-X	Quilla 244104	73,13	E-Z	Quilla 159005	88,2	W-Z
Rquilla 389	46,9	A-N	Quilla 249005	54,77	A-W	Quilla 245801	64	A-X	Quilla 256402	73,57	E-Z	Quilla 242114	88,3	W-Z
Quilla 257501	47,07	A-O	Quilla 67201	55,23	A-W	Quilla 139103	64	A-X	Quilla 244501	73,73	F-Z	Quilla 233008	90,83	X-Z
Quilla 256604	47,1	A-O	Quilla 256801	55,8	A-X	Rquilla 392	65,1	B-X	Quilla 154601	74,77	G-Z	Rquilla 418	101,23	Y-a
Quilla 241608	47,6	A-P	Quilla 254102	56,07	A-X	Quilla 222704	65,13	B-X	Quila 241305	74,93	H-Z	Quilla 249304	104,67	Za
Rquilla 384	49,17	A-Q	Quilla 260405	56,2	A-X	Quilla 213801	65,23	B-X	Quilla 262801	75,23	H-Z	Quilla 230602	131,27	a

El análisis estadístico corresponde a una ANOVA. Letras diferentes corresponden a medias distintas (LSD Fisher; $P < 0,05$).

Otras evaluaciones para analizar la tolerancia al frío en la etapa reproductiva de material genético chileno fueron realizadas en la Estación Experimental Chuncheon, Instituto Nacional de Ciencias de Cultivos, Administración de Desarrollo Rural, Corea del Sur (37° 51' Lat Norte 127° 36' Long Este). Los experimentos se realizaron utilizando agua fría (17 °C) en condiciones de invernadero y campo (Foto 2).

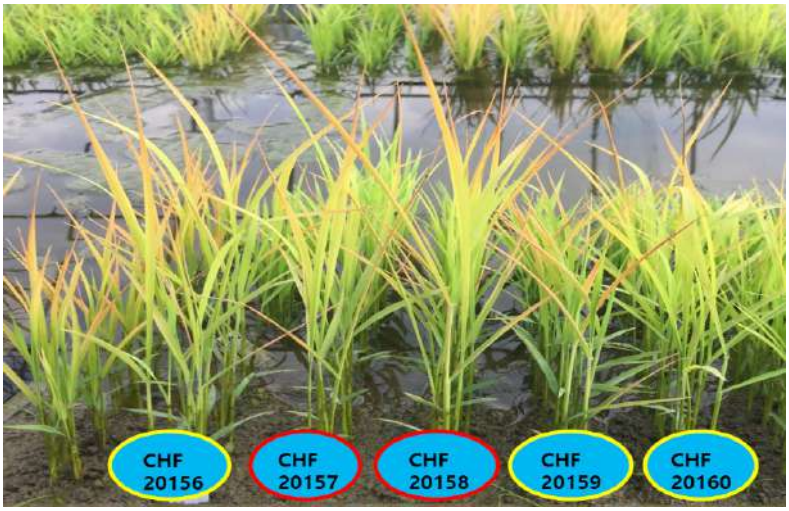


Foto 2. Evaluación de genotipos chilenos en la Estación Experimental Chuncheon, Instituto Nacional de Ciencias de Cultivos, RDA, Corea del Sur.

Los resultados mostraron que el tratamiento de 17 °C por 10 d, afecta la fertilidad del cultivo, disminuyendo a menos de la mitad cuando es tratado durante la microsporogénesis. El tratamiento es más perjudicial durante la excersión de panícula, observándose niveles de fertilidad inferiores a 10 % (Figura 18). El genotipo con mejor proyección en la evaluación realizada durante microsporogénesis fue CHF20149 y durante la excersión de panícula fueron CHF20159 y CH20153.

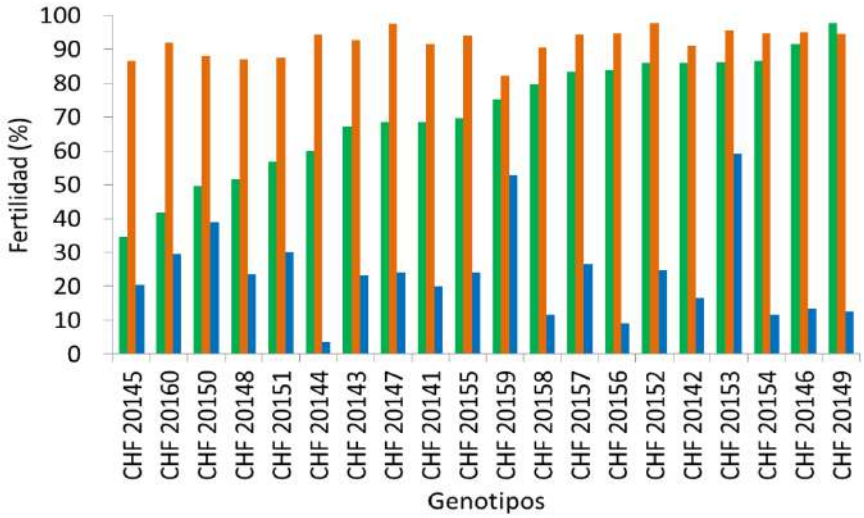


Figura 18. Estudio de la tolerancia al frío, utilizando agua fría en etapa de microsporogénesis. El color verde corresponde al tratamiento durante la microsporogénesis a 17 °C por 10 d, el color azul corresponde al tratamiento por bajas temperaturas durante la etapa de excersión de panícula por 10 d (17 °C) y color naranjo corresponde a control.

Por otro lado, el estudio en condiciones de campo, utilizando agua fría (17 °C) desde el trasplante hasta madurez del cultivo, generó, en algunos genotipos, una disminución de la fertilidad, con valores inferiores a 5 % (Figura 19). Sin embargo, más de la mitad del material evaluado mostró niveles de fertilidad superior al 70 %, con un máximo de 90 % para CHF20157. Finalmente, el genotipo CHF20149, que presentó buenos niveles de tolerancia al frío en condiciones controladas (microsporogénesis), alcanzó uno de los porcentajes de fertilidad más bajos, posterior al tratamiento en condiciones de campo.

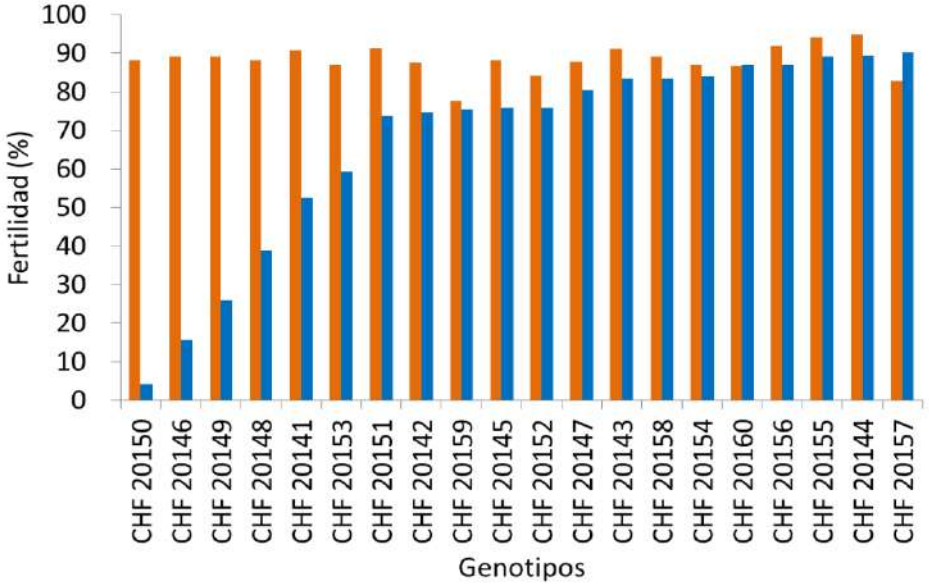


Figura 19. Estudio de la tolerancia al frío utilizando agua fría en condiciones de campo desde el trasplante hasta la madurez. El color naranja corresponde al control y el color azul al tratamiento (17 °C).

Conclusiones

Debido a la presencia de bajas temperaturas nocturnas durante todo el periodo de crecimiento del cultivo del arroz en Chile, la tolerancia al frío es un atributo indispensable para el crecimiento y desarrollo de este cultivo en nuestro país. Por ello, el uso de herramientas adecuadas que permitan seleccionar con eficacia y eficiencia los mejores genotipos candidatos para la tolerancia al frío, en las diferentes etapas del desarrollo del cultivo del arroz, es una constante necesidad. En este capítulo, dedicado a describir los principales estudios realizados en este tema en nuestro país, permite encontrar metodologías efectivas para la realización de evaluaciones en condiciones controladas y de campo. Es importante destacar que no se observó una correlación entre la tolerancia al frío en diferentes etapas del desarrollo. Es así como genotipos que son tolerantes en las primeras etapas de desarrollo, pueden tener bajos niveles de tolerancia al frío en las etapas siguientes.

Los estudios respecto a la tolerancia al frío en el cultivo del arroz en Chile, muestran que el material genético presente en el país tiene altos niveles de tolerancia al frío en las etapas de germinación y plántula. Sin embargo, respecto a la tolerancia a frío en la etapa reproductiva se determinó que existe una brecha importante respecto a los niveles de tolerancia actuales presentes en nuestros genotipos. Debido a las condiciones climáticas en nuestro país, es prioritario continuar con la evaluación y selección de material genético tolerante a bajas temperaturas y con mayor precocidad, considerando la introducción de material genético de países del hemisferio norte.

Referencias

Aghaee, A., Moradi, F., Zare-Maivan, H., et al. 2011. Physiological responses of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to chilling stress at seedling stage. Afr. J. Biotechnol. 10: 7617-7621.

Ahmad, P., Sarwat M., Sharma, S. 2008. Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants. J. Plant Biol. 51: 167-173.

Ali, M.G., Naylor, R.E.L., Matthews, S. 2006. Distinguishing the effects of genotype and seed physiological age on low temperature tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). Exp. Agric. 42(3): 337-349.

Allen, D.J., Ort, D.R. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. Trends Plant Sci. 6: 36-42.

Alvarado, J., Grau, P. 1991. Mejoramiento del arroz en Chile por tolerancia a frío. p. 105-114. En Puignau J. (ed.) Reunión sobre mejoramiento de arroz en el Cono Sur. 17-21 de julio, 1989. IICA. PROCISUR. Montevideo, Uruguay.

Alvarado, J.R. y Hernaíz, S. 2007. Antecedentes generales sobre el arroz en Chile. Arroz: Manejo Tecnológico. pp: 7-20. Boletín INIA N°162. INIA Quilamapu. Chillán, Chile.

Andaya, V.C., Mackill, D.J. 2003. Mapping of QTLs associated with cold tolerance during the vegetative stage in rice. J. Exp. Bot. 54: 2579-2585.

Asada, K. 1999. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 50:601-639.

Barkla, B.J., Vera-Estrella, R., Pantoja, O. 2013. Progress and challenges for abiotic stress proteomics of crop plants. Proteomics 13: 1801-1815.

Baruah, A., Ishigo-Oka, N., Adachi, M. 2009. Cold tolerance at the early growth stage in wild and cultivated rice. Euphytica 165: 459-470.

Bewley, J.D. 1997. Seed germination and dormancy. Plant Cell. 9: 1055-1066.

Bewley, J.D., Black, M. 1994. Seeds: physiology of development and germination. Plenum Press, New York, USA.

Bonnecarrère, V., Borsani, O., Díaz, P., et al. 2011. Response to photoxidative stress induced by cold in japonica rice is genotype dependent. Plant Sci. 180: 726–732.

Bosetti F., Montebelli, C., Novembre, A.D., et al. 2012. Genetic variation of germination cold tolerance in Japanese rice germplasm. Breeding Sci. 62: 209-215.

Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Anal. Biochem. 72: 248-254.

Cabas, P. 2012. Tolerancia al frío en genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) al estado de plántula. 34 p. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Departamento de Producción Vegetal, Chillán, Chile.

Campos, P.S., Quartin, V., Ramalho, J.C. 2003. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. plants. J. Plant Physiol. 160: 283-292.

Castillo, D., Alvarado, J. 2002. Caracterización de germoplasma de arroz para tolerancia a frío en la etapa de germinación. Agric. Téc. (Chile) 62: 596-605.

Chang, M.C., Chien, W.F., Chao, C.H., et al. 2010. Effects of cold stress on alterations of physiochemical and chemical properties of rice polysaccharides. Carbohydr. Polym. 80: 373-376.

Chen, Q., Yang, L., Ahmad, P., et al. 2011. Proteomic profiling and redox status alteration of recalcitrant tea (*Camellia sinensis*) seed in response to desiccation. Planta 233: 583-592.

Cheng, L., Gao, X., Li, S. et al. 2010. Proteomic analysis of soybean [*Glycine max* (L.) Meer.] seeds during imbibition at chilling temperature. Mol. Breed. 26: 1-17.

Cruz, M. 2010. Tolerancia del arroz a la temperatura baja. p. 180-190. En Degiovanni, V., Martínez, C., Motta, F. (eds.) Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Publicación CIAT N° 365. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Cruz, R.P., Milach, S.C.K. 2004. Cold tolerance at the germination stage of rice: methods of evaluation and characterization of genotypes. Sci. Agric. 61: 1-8.

da Cruz, R., Milach, S.C., Federizzi, L.C. 2006. Inheritance of rice cold tolerance at the germination stage. Genet. Mol. Biol. 29: 314–320.

da Cruz R.P., Sperotto, R.A., Cargnelutti, D., et al. 2013. Avoiding damage and achieving cold tolerance in rice plants. Food Energy Secur. 2: 96-119.

Dall'Osto, L., Cazzaniga, S., North, H., et al. 2007. The *Arabidopsis aba*4-1 mutant reveals a specific function for neoxanthin in protection against photooxidative stress. Plant Cell. 19: 1048-1064.

Danty, J., Muñoz, M. 2010. Mercado del arroz: situación Mundial y Nacional. Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

de los Reyes, B.G., Morsy, M., Gibbons, J. et al. 2003. A snapshot of the low temperature stress transcriptome of developing rice seedling (*Oryza sativa* L.) via ESTs from subtracted cDNA library. Theor. Appl. Genet. 107: 1071-1082.

Demmig-Adams, B., Adams, W.W. 1992. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 43: 599-626.

Deng, Z.Y., Gong, C.Y., Wang, T. 2013. Use of proteomics to understand seed development in rice. Proteomics 13: 1784-1800.

Díaz, S., Morejón, R., Castro, R., et al. 2006. Comportamiento de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) seleccionados para tolerancia a bajas temperaturas en siembra temprana de frío. Cultivos Tropicales. 27: 71-75.

Dionisio-Sese, M.L., Tobita, S. 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. Plant Sci. 135: 1-9.

Donoso, G., Cabas, P., Paredes, M., et al. 2015. Cold tolerance evaluation of temperate rice (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*) genotypes at the seedling stage. Gayana Bot. 72: 1-13.

Donoso, G., Leyton, M., Paredes, M., et al. 2014. Relative expression of genes related with cold tolerance in temperate rice at the seedling stage. Afr. J. Biotech. 13: 2506-2512.

Donoso, G., Paredes, M. 2013. Efecto del clima en el rendimiento del arroz. Tierra Adentro 104: 7-10.

Donoso, G., Paredes, M., Arbiza, O., et al. 2013a. Cold tolerance evaluation of Chilean rice (*Oryza sativa* L.) genotypes at germination stage. Chil. J. Agric. Res. 73: 3-8.

Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V. 2013b. Study of pollen development in Rice under controlled conditions. VIII Reunión anual de la Sociedad de Biología Vegetal, Pucón.

Fischer, K.S., Barton, J., Khush, G.S., et al. 2000. Genomics and agriculture. Collaborations in rice. Science 290: 279-280.

Foyer, C.H., Descourvières, P., Kunert, K.J. 1994. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants. Plant Cell Environ. 17: 507-523.

Foyer, C.H., Lopez-Delgado, H., Dat, J.F. et al. 1997. Hydrogen peroxide- and glutathione-associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signalling. Physiol. Plant. 100: 241-254.

Fuentealba, V., Finot, V., Wilckens, R., et al. 2014. Efectos de la disminución de temperatura sobre el desarrollo de la pared de la antera y el grano de polen en Oryza sativa L. Gayana Bot. 71:199-215.

Goff, S.A., Ricke, D., Lan, T.H. 2002. A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. japonica). Science 296: 92-100.

Guo, Z., W. Ou, S. Lu and Q. Zhong. 2006. Differential responses of antioxidative system to chilling and drought in four rice cultivars differing in sensitivity. Plant Physiol. Biochem. 44: 828-836.

González, J., Aceituno, U., Paredes, M., et al. 2013. Study of cold tolerance in temperate rice at germination stage (*Oryza sativa* L.) using proteomic tools. VIII Reunión Anual de la Sociedad de Biología Vegetal, Pucón, Chile.

Hammond-Kosack, K.E., J.D. Jones. 1996. Resistance gene-dependent plant defense responses. Plant Cell 8: 1773-1791.

Hill, R.R. J., Rosenberger, J.L. 1985. Methods for combining data from germplasm evaluation trials. Crop Sci. 25: 467-470.

Huang, M., Guo, Z. 2005. Responses of antioxidative system to chilling stress in two rice cultivars differing in sensitivity. Biol. Plantarum. 49: 81-84.

Huang, H., Møller, I.M., Song, S.Q. 2012. Proteomic of desiccation tolerance during development and germination of maize embryos. J. Proteomics 75: 1247-1262.

Ismail, A.M., Hall, A.E., Close, T.J. 1999. Purification and partial characterization of a dehydrin involved in chilling tolerance during seedling emergence of cowpea. Plant Physiol. 120: 237-244.

Jain, M., Kaur, N., Garg, R., et al. 2006b. Structure and expression analysis of early auxin-responsive *Aux/IAA* gene family in rice (*Oryza sativa*). Funct. Integr. Genom. 6: 47-59.

Jain, M., Kaur, N., Tyagi, A.K., et al. 2006a. The auxin-responsive *GH*3 gene family in rice (*Oryza sativa*). Funct. Integr. Genom. 6: 36-46.

Jain, M., Nijhawan, A., Tyagi, A.K. 2006c. Validation of housekeeping genes as internal control for studying gene expression in rice by quantitative real-time PCR. Biochem. Biophys. Res. Commun. 345: 646–651.

Jeong, S.W., Choi, S.M., Lee, D.S., et al. 2002. Differential susceptibility of photosynthesis to light-chilling stress in rice (*Oryza sativa* L.) depends on the capacity for photochemical dissipation of light. Mol Cells 13: 419-428.

Kim, S., Kim, D., Tai, T.H. 2012. Evaluation of rice seedling cold tolerance to constant and intermittent low temperature stress. Rice Sci. 19: 295–308.

Kim, S.I., Tai, T.H. 2011. Evaluation of seedling cold tolerance in rice cultivars: a comparison of visual ratings and quantitative indicators of physiological changes. Euphytica 178: 431-447.

Kim, S.T., Kang, S.Y., Wang, Y. et al. 2008. Analysis of embryonic proteome modulation by GA and ABA from germinating rice seeds. Proteomics 8: 3577-3587.

Koseki, M., Kitazawa, N., Yonebayashi, S. 2010. Identification and fine mapping of a major quantitative trait locus originating from wild rice, controlling cold tolerance at the seedling stage. Mol. Genet. Genomics 284: 45-54.

Kranner, I., Minibayeva, F.V., Beckett, R.P., et al. 2010. What is stress? Concepts, definition and applications in seed science. New Phytol. 188: 655-673.

Kuk, Y.I., Shin, J.S., Burgos, N.R., et al. 2003. Antioxidative enzymes offer protection from chilling damage in rice plants. Crop Sci. 43: 2109-2117.

Lee, S.E., Park, S.J., Jung, J.A. 2011. Proteomic analysis of seed of early maturing line of barley, '*Eam9*'. Aust. J. Crop Sci. 5: 801-808.

Li, X., Bai, H., Wang, X., et al. 2011. Identification and validation of rice reference proteins for western blotting. J. Exp. Bot. 62: 4763-4772.

Lichtenthaler, H.K. 1996. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. J. Plant Physiol. 148: 4-14.

Liu, S., Yang, C., Xie, W., et al. 2012. The effects of cadmium on germination and seedling grown of *Suaeda salsa*. Procedia Environ. Sci. 16: 293-298.

Lyons, J.M. 1973. Chilling injury in plants. Annu. Rev. Plant Physiol. 24: 445-466.

Mackill, D.J. and X. Lei. 1997. Genetic variation for traits related to temperate adaptation of rice cultivars. Crop Sci. 37: 1340-1346.

Maclean, J.L., Dawe, D.C., Hardy, B., et al. 2002. Importance of rice. p. 1-8. In Maclean, J., Dawe, D., Hardy, B., et al. (eds.) Rice almanac: source book for the most important economic activity on Earth. (3rd. ed.). CABI Publishing, Wallingford, UK.

Malan, C., Greyling, M.M., Gressel, J. 1990. Correlation between CuZn superoxide dismutase and glutathione reductasa, and environmental and xenobiotic stress tolerance in maize inbreds. Plant Sci. 69: 157-166.

Malecka, A., Jarmuszkiewicz, W., Tomaszewska, B. 2001. Antioxidative defense to lead stress in subcellular compartments of pea root cells. Acta Biochim. Pol. 48: 678-698.

Massardo, F., Corcuera, L., Alberdi, M. 2000. Embryo physiological responses to cold by two cultivars of oat during germination. Crop Sci. 40: 1694-1701.

McDonald, M.B., Vertucci, C.W., Roos, E.E. 1988. Seed coat regulation of soybean seed imbibition. Crop Sci. 28: 987-992.

Mejías, O.I., Pulver. E.L. 1989. Identificación de metodologías para la evaluación de tolerancia a temperaturas bajas en arroz (*Oryza sativa* L.). Acta Agron. 39: 7-17.

Moradi, F., Ismail, A.M. 2007. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ROS-scavenging systems to salt stress during seedling and reproductive stages in rice. Ann. Bot. 99: 1161-1173.

Morsy, M.R., Jouve, L., Hausman, J.F., et al. 2007. Alteration of oxidative and carbohydrate metabolism under abiotic stress in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes contrasting in chilling tolerance. J Plant Physiol. 164: 157–167.

Nijsse, J., Erbe, E., Brantjes, N.B.M., et al. 1998. Low-temperature scanning electron microscopic observations on endosperm in imbibed and germinated lettuce seed. Can. J. Bot. 76: 509-516.

Nishiyama, Y., Allakhverdiev, S.I., Murata, N. 2006. A new paradigm for the action of reactive oxygen species in the photoinhibition of photosystem II. Biochim. Biophys. Acta 1757: 742-749.

Ortega, R. 2007. Analysis of factors affecting spikelet sterility in flooded rice under field conditions in Chile. Agron. Soil Sci. 53:183-192.

Park, I.K., Oh, C.S., Kim, D.M. 2013. QTL Mapping of Cold Tolerance at the Seedling Stage using Introgression Lines Derived from an Intersubspecific Cross in Rice. Plant Breed. Biotech. 1: 1-8.

Parrish, D.J., Leopold, A.C. 1977. Transient changes during soybean imbibition. Plant Physiol. 59: 1111-1115.

Pawlowski, T.A. 2007. Proteomics of European beech (*Fagus sylvatica* L.) seed dormancy breaking: influence of abscisic and gibberellic acids. Proteomics 7: 2246-2257.

Pawlowski, T.A. 2009. Proteome analysis of Norway maple (*Acer platanoides* L.) seeds dormancy breaking and germination: influence of abscisic and gibberellic acids. BMC Plant Biol. 9(48).

Piepho, H.P., Möhring, J., Melchinger, A.E. 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. Euphytica 161: 209-228.

Prasad, T.K. 1996. Mechanisms of chilling-induced oxidative stress injury and tolerance in developing maize seedlings: changes in antioxidant system, oxidation of proteins and lipids and protease activities. Plant J. 10: 1017–1026.

Raghavan, V. 1988. Anther and Pollen Development in Rice (*Oryza sativa*). American Journal of Botany. 75: 183-196.

Rajjou, L., Gallardo, K. Debeaujon, I., et al. 2004. The effect of α-Amanitin on the Arabidopsis seed proteome highlights the distinct roles of stored and neosynthesized mRNAs during germination. Plant Physiol. 134: 1598-1613.

Saruyama, H., Tanida, M. 1995. Effect of chilling on activated oxygen- scavenging enzymes in low temperature sensitive and -tolerant cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). Plant Sci. 109: 105–113.

Schneider, C.A., Rasband, W.S. Eliceiri, K.W. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat. Methods 9: 671-675.

Sharifi, P., Aminpanah, H. 2010. Evaluation eighteen rice genotypes in cold tolerance at germination stage. World Applied Sciences Journal 11: 1476-1480.

Sheoran, I.S., Olson, D.J.H., Ross, A.R.S. 2005. Proteome analysis of embryo and endosperm from germinating tomato seeds. Proteomics 5: 3752-3764.

Sikuku, P.A., Netondo, G.W., Onyango, J.C., et al. 2010. Chlorophyll fluorescence, protein and chlorophyll content of three nerica rainfed rice varieties under varying irrigation regimes. J. Agric. Biol. Sci. 5: 19-25.

Suzuki, K., Nagasuga, K., Okada, M. 2008. The chilling injury induced by high root temperature in the leaves of rice seedlings. Plant Cell Physiol. 49: 433-442.

Tambussi, E.A. 2004. Fotosíntesis, fotoprotección, productividad, y estrés abiótico: algunos casos de estudio. Dissertation, Universitat de Barcelona.

Tan, L., Chen, S. Wang T., et al. 2013. Proteomic insights into seed germination in response to environmental factors. Proteomics 13: 1850-1870.

Trebst, A. 2003. Function of -carotene and tocopherol in photosystem II. Z. Naturforsch. C. 58: 609-620.

Van Breusegem, F., Slooten, L., Stassart, J.M., et al. 1999. Overproduction of Arabidopsis thaliana FeSOD confers oxidative stress tolerance to transgenic maize. Plant Cell Physiol. 40: 515-523.

Verma, S., Dubey, R.S. 2003. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. Plant Sci. 164: 645-655.

Wang, G.J., Miao, W., Wang, J.Y., et al. 2013. Effects of exogenous abscisic acid on antioxidant system in weedy and cultivated rice with different chilling sensitivity under chilling stress. J. Agron. Crop Sci. 199: 200-208.

Wang, W., Vignani, R., Scali, M. 2006. A universal and rapid protocol for protein extraction from recalcitrant plant tissues for proteomic analysis. Electrophoresis 27: 2782-2786.

Wang, Z., Wang, J., Wang, F., et al. 2009. Genetic control of germination ability under cold stress in rice. Rice Sci. 16: 173-180.

Waterworth, W.M., Masnavi, G., Bhardwaj, R.M., et al. 2010. A plant DNA ligase is an important determinant of seed longevity. Plant J. 63: 848-860.

Yang, P., Li, X., Wang, X., et al. 2007. Proteomic analysis of rice (*Oryza sativa* L.) seeds during germination. Proteomics 7: 3358-3368.

Yang, F., Svensson, B., Finnie, C. 2011. Response of germinating barley seeds to *Fusarium graminearum*: The first molecular insight into Fusarium seedling blight. Plant Physiol. Biochem. 49: 1362-1368.

Ye, C., Fukai, S., Godwin, I., et al. 2009. Cold tolerance in rice varieties at different growth stages. Crop. Pasture Sci. 60: 328-338.

Yoshida, S. 1981. Climatic environment and its influence. p. 65-110. In Yoshida, S. (ed.) Fundamentals of rice crop science. The International Rice Research Institute. Manila, Philippines.

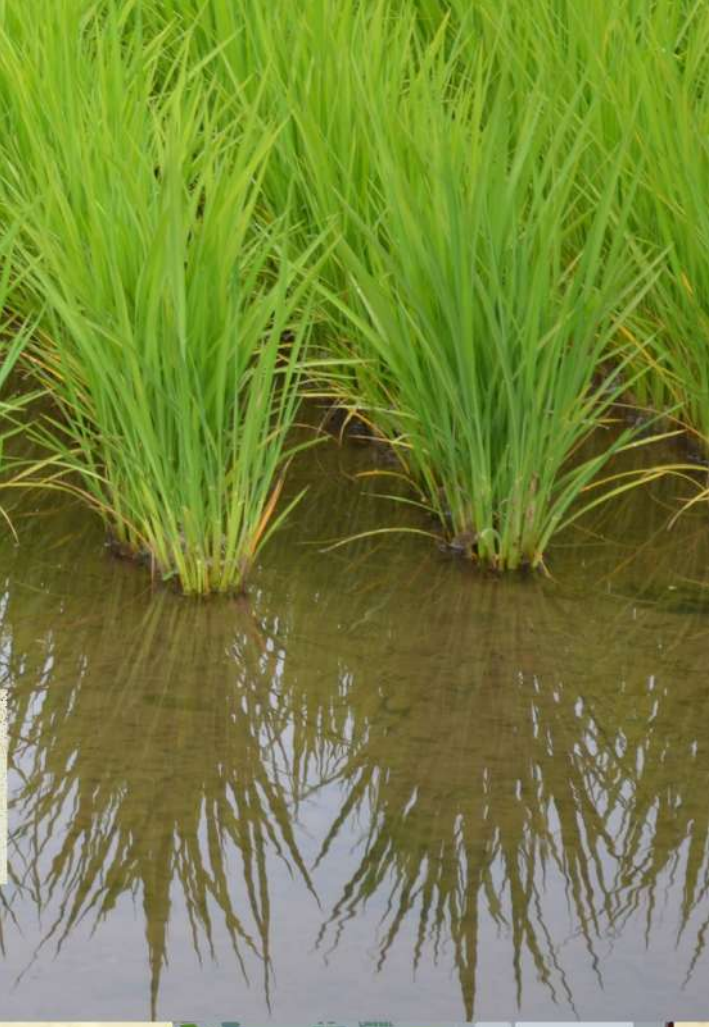
Yoshida, R., Kanno, A., Sato, T., et al. 1996. Cool temperature induced chlorosis in rice plants. I. Relationship between the induction and a disturbance of etioplast development. Plant Physiol. 110: 997–1005.

Yu, J., Hu, S., Wang, J. 2002. A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. indica). Science 296: 79-92.

Yun, K.-Y., Park, M.R., Mohanty, B. 2010. Transcriptional regulatory network triggered by oxidative signals configures the early response mechanisms of japonica rice to chilling stress. BMC Plant Biol. 10:16.

Zhang, W., Jiang, B. Li, W., et al. 2009. Polyamines enhance chilling tolerance of cucumber (*Cucumis sativus* L.) through modulating antioxidative system. Sci. Hortic. 122: 200-208.

CALIDAD



SECCIÓN IV. CALIDAD

Capítulo 9. Calidad del grano de arroz

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Katherine Loaiza.

La calidad de un producto es definida por el conjunto de propiedades y características del mismo que satisfacen las necesidades particulares de los usuarios finales. En este contexto, la calidad del grano de arroz constituye el conjunto de todas las propiedades y características del arroz que satisfagan las necesidades de los consumidores (Bao, 2014).

Actualmente, existe una gran cantidad de información genética sobre las diferentes características que definen la calidad del arroz y que pueden ayudar a mejorar el producto producido y consumido por la población.

Grano de arroz

El grano de arroz es una estructura compleja formada por una capa protectora exterior que lo cubre, llamada cáscara (lemma y palea), y la cariopsis de arroz o fruto. El arroz integral está compuesto de una capa exterior (pericarpio) que cubre la semilla, y el nucellus que cubre el embrión y el endospermo. El endospermo, a su vez, está constituido por una capa ubicada bajo la aleurona (subaleurona) y el almidón o endosperma interno. El embrión está formado por el esculeto, la plúmula, la radícula y el epiblasto (Figura 1).

Además de estas estructuras, existen otras que están asociadas al grano como son las lemmas estériles, ubicadas en la base del grano y la raquilla situada en el extremo opuesto de la arista que constituye una prolongación de la lemma (Figura 1).

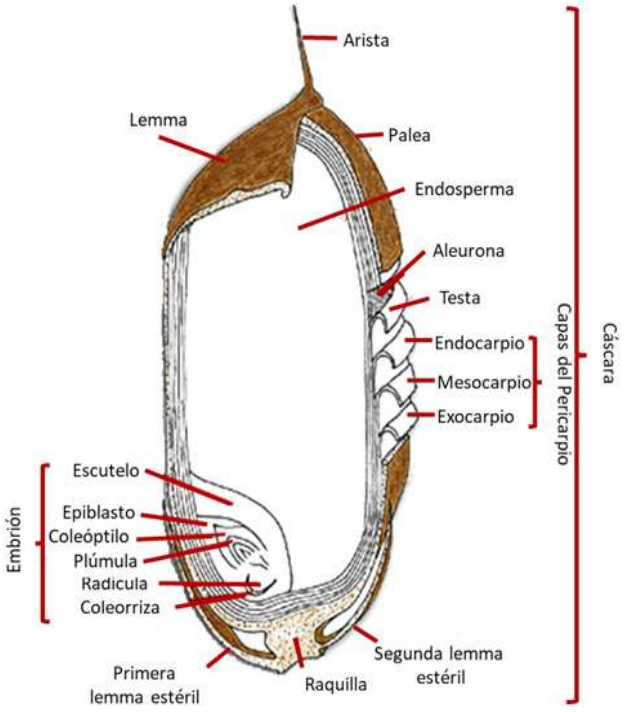


Figura 1. Corte longitudinal de un grano de arroz (Adaptado de Juliano, 1993).

La cáscara constituye, aproximadamente, 20 % del peso del grano, pero puede variar entre 16 % y 28 %. Los pesos de los componentes del arroz integral (sin cáscara) son el pericarpio que representa entre 1 % y 2 % del peso, la aleurona, nucellus y cubierta de la semilla que constituye entre el 4 y 6 %, el embrión 1 %, esculeto 2 % y el endospermo que concentra entre el 90 % y 91 % (Juliano, 1992).

La aleurona puede estar formada por una a cinco capas, siendo más gruesa en la parte dorsal del grano que en su parte ventral, y también en los granos cortos más que en los largos. La aleurona y las células del embrión son ricas en proteínas y contienen fitatos y lípidos. Las células del endosperma están cubiertas por una membrana delgada que contiene los amiloplastos, estructuras donde se alojan los gránulos de almidón. La capa de células ubicada bajo la aleurona (subaleurona) es rica en proteínas y lípidos, y contiene amiloplastos y gránulos de almidón más pequeños que las células del interior del endosperma. Finalmente, los gránulos de almidón tienen una forma de poliedro de un tamaño de entre 3 y 9 µm, mientras que las proteínas, principalmente redondas, alcanzan dimensiones que varían entre 0,5 y 4,0 µm, siendo las proteínas de la subaleurona las de menor tamaño (Juliano, 1992).

Tipos de arroz

El Codex Alimentarius (2007) entrega tres opciones para clasificar el tamaño del grano y establece que los comerciantes deben indicar la opción de clasificación que deseen utilizar.

Opción 1. Relación longitud/anchura del grano

Arroz de grano largo. Corresponde al arroz descascarado o arroz descascarado sancochado, cuya relación longitud/anchura es ≥ 3,1, o de ≥ 3,0 o más.

Arroz grano medio. Es el arroz descascarado o arroz descascarado sancochado, cuya relación longitud/anchura es de 2,1 a 3,0 o de 2,0 a 2,9.

Arroz grano corto. Es el arroz descascarado o arroz descascarado sancochado, cuya relación longitud/anchura es ≤ 2,0, o ≤ 1,9.

Opción 2. Longitud del grano

Arroz de grano largo. Corresponde al arroz cuya longitud de grano es ≥ 6,6 mm.
Arroz de grano medio. Es el arroz cuya longitud de grano es ≥ 6,2 mm, pero ≤ 6,6 mm.
Arroz de grano corto. Es el arroz cuya longitud de grano es ≤ 6,2 mm.

Opción 3. Combinación de la longitud y la relación longitud/anchura

Arroz de grano largo. Tiene una longitud ≥ 6,0 mm y una relación de longitud/anchura ≥ 2, pero ≤ 3,0 o una longitud del grano ≥ 6,0 mm y una relación de longitud/anchura ≥ 3,0.

Arroz de grano medio. Tiene una longitud de grano ≥ 5,2 mm, pero ≤ 6,0 mm o una relación largo/ancho ≤ 3,0.

Arroz de grano corto. Tiene una longitud del grano ≤ 5,2 mm y una relación largo/ancho ≤ 2,0.

En este aspecto existen varias formas de clasificar el grano, de acuerdo a la normativa de cada país. A continuación, se describen algunos sistemas utilizados por el IRRI, U.S.A. y la Unión Europea.

Instituto Internacional para la Investigación en Arroz (IRRI)

La FAO y el IRRI (Juliano, 1993) clasifican a los granos de arroz en las siguientes categorías:

Clasificación por tamaño

Extra largo: largo de grano > 7,5 mm
Largo: largo de grano varía de 6,61 a 7,50 mm
Grano medio: largo de grano varía de 5,51 a 6,60 mm
Corto: largo de grano < 5,5 mm

Relación largo/ancho

Delgado: relación largo/ancho > 3,0
Medio: relación largo/ancho entre 2,1 y 3,0
´Bold`: relación largo/ancho entre 1,1 y 2,0
Redondo: relación largo/ancho < 1,0

Estados Unidos

De acuerdo a la Comisión Internacional de Comercio de U.S.A. (United States International Trade Commission, 2015), el arroz se clasifica en tres categorías dependiendo de su tamaño:

Largo. El largo del grano es cuatro a cinco veces su ancho. Estos arroces se caracterizan por separarse fácilmente después de su cocción. Representan un 75 % del mercado mundial.

Medio. Tienen un largo de grano dos a tres veces su ancho. Generalmente, estos arroces son más húmedos con tendencia a pegarse unos a otros. Representan un 10 % del mercado global, con preferencia en Japón, Turquía y el Medio Oriente.

Corto. La forma del grano es casi redonda. Estos arroces son más suaves que los granos largos y se tienden a pegar después de cocidos.

U.S.A. distingue cuatro grandes tipos de ´variedades` según la especie y ciertas características sensoriales de las variedades.

Indica. Arroz largo delgado no glutinoso. Generalmente crece en climas cálidos, especialmente en el Sudeste de China, India, Tailandia y Vietnam.

Japonica. Sus granos son más redondeados y tienden a pegarse después de cocidos. Crece preferentemente en climas templados. Este tipo de arroces representa, aproximadamente, un 10 % del mercado mundial.

Aromáticos. Presentan en forma natural un aroma similar al ´popcorn`. Los principales tipos aromáticos son Jasmine y Basmati que representan un 12 % del mercado mundial.

Glutinoso. Es dulce, usado para postres y otras preparaciones. Crece principalmente en el Sudeste de Asia y representa menos de un 2 % del mercado mundial del arroz.

Unión Europea

De acuerdo al Título 1006, la Comisión Europea clasifica el arroz en las siguientes categorías:

Arroz con cáscara (1006 10 - Rice in the husk, paddy or rough). Arroz que está adherido firmemente a la cáscara.

Arroz integral (1006 20 - Husked ´brown rice`; ´cargo rice`, ´loonzain` y ´riso sabamato`). Arroz al que se le ha removido la cáscara, pero mantiene el pericarpio o capas externas del grano (bran) y

el embrión, lo que le da un sabor agradable, pero tiene una textura fibrosa. El arroz de grano largo integral tiende a ser menos esponjoso y tierno, y el grano redondo menos pegajoso. En general, el grano integral aumenta su tamaño dos veces después de cocido y es más perecible.

Arroz semi o completamente molinado, pulido o glaseado (1006 30 - Semi milled or wholly milled rice, whether or not polished or glazed). El arroz semi molinado es aquel que contiene aún las capas más internas del pericarpio, a diferencia del completamente molinado donde todas las capas del pericarpio han sido removidas. El glaceado consiste en un tratamiento que permite cubrir el grano con glucosa y talco.

Grano sancochado, parbolizado (´parboiled rice`). Después del proceso de limpiado y previo a cualquier tratamiento de molinado, el arroz es remojado en agua caliente o al vapor y luego secado. Este tipo de arroz puede ser utilizado para producir arroz integral o arroz pulido.

Arroz quebrado (1006 40 - Broken rice). Arroz de un tamaño menor a ¾ partes del grano que mantiene su forma. Este tipo de arroz es de menor calidad y se usa, generalmente, en fórmulas para bebés, cereales de arroz, alimento para mascotas, vino, harina y alimentos enlatados.

Clasificación por tamaño

Grano corto (referido también como redondo). El largo del grano es no mayor a 5,2 mm y su relación largo/ancho menor a 2. Los granos húmedos se pegan después de cocidos y se usan preferentemente para confeccionar dulces.

Grano medio. El largo del grano varía entre 5,2 y 6,0 mm y su relación largo/ancho es menor a 3. Se usa preferentemente para paellas y risottos.

Grano largo. Es un grano largo y delgado, con un largo de grano mayor a 6 mm. Es un grano que se separa después de cocido.

Clasificación del arroz cocido (Unión Europea)

De acuerdo al Título 1904 se clasifican en platos preparados y para microonda, que incluyen diferentes porciones de ingredientes.

Grado de molienda

En relación al grado de molienda, el Codex Alimentarius (2007) señala que el arroz elaborado (arroz blanco) se puede clasificar en tres categorías.

Arroz semielaborado: se obtiene por elaboración del arroz descascarado, pero en un grado menor para satisfacer los requisitos del arroz elaborado.

Arroz bien elaborado: se obtiene por elaboración del arroz descascarado, de forma que se elimina parte del germen y todas las capas externas y la mayoría de las capas internas del salvado.

Arroz muy elaborado: se obtiene por elaboración del arroz descascarado, de forma que se elimina casi por completo el germen, todas las capas externas y la mayor parte de las capas internas del salvado, así como parte del endosperma.

Tolerancia de granos defectuosos

El Codex Alimentarius (2007) establece diferentes grados de tolerancia de granos defectuosos y la presencia de otros tipos de arroz en los diversos tipos de arroz elaborados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Niveles de tolerancia de granos defectuosos y de otros tipos de arroces en cuatro categorías de arroz.

Granos defectuosos	Arroz/límite máximo			
	Descascarado (% m/m)	Elaborado (% m/m)	Descascarado sancochado (% m/m)	Elaborado sancochado (% m/m)
Granos dañados por calor	4,0	3,0	8,0	6,0
Granos dañados	4,0	3,0	4,0	3,0
Granos inmaduros	12,0	2,0	12,0	2,0
Granos yesosos	11,0	11,0	s/i	s/i
Granos rojos	12,0	4,0	12,0	4,0
Granos rojizos veteados	s/i	8,0	s/i	8,0
Granos manchados	s/i	s/i	4,0	2,0
Niveles máximos recomendados de otros tipos de arroz				
Arroz con cáscara	2,5	0,3	2,5	0,3
Arroz descascarado	s/i	1,0	s/i	1,0
Arroz elaborado	s/i	s/i	2,0	2,0
Arroz glutinoso	1,0	1,0	1,0	1,0

Fuente: Codex Alimentarius, 2007. s/i: sin información.

Calidad del grano

La calidad del grano es una característica compleja que incluye aspectos relacionados con el procesamiento industrial, la apariencia del grano (tamaño, forma, panza blanca), aspectos culinarios, de consumo (propiedades del almidón, cantidad aparente de amilosa, temperatura de gelatinización, consistencia y viscosidad) y nutricionales (Fitzgerald et al., 2009; Chen et al., 2012; Bao, 2014; Zhao et al., 2015).

Calidad industrial

La calidad industrial es una característica muy importante para la industria y los agricultores, pues determina el rendimiento final y el valor del producto elaborado (Zheng et al., 2007; Bao, 2014).

El primer paso en el procesamiento industrial del arroz es la remoción de la cáscara del grano, lo que da origen a un grano con tegumento (´bran`) que se conoce como grano integral (´brown`). Este tegumento adherido al grano está formado por la aleurona, el pericarpio y el embrión. Posteriormente, este tegumento es removido del grano para obtener el arroz pulido (Qui et al., 2015). La calidad industrial (´milling quality`) se mide principalmente como porcentaje de grano integral (´brown`), grano industrial (´milled`), o grano entero (´head`) (Qui et al., 2015; Wang et al., 2017).

La calidad industrial es una característica compleja que incluye varios productos, cada uno de ellos influenciado por factores genéticos y ambientales (Zheng et al., 2007; Qui et al., 2015). La información disponible señala que se han descrito pocos genes/loci (´QTLs, quantitative trait loci`) asociados a la calidad industrial (Tan et al., 2001; Zheng et al., 2007; Lou et al., 2009; Nelson et al.,

2011; Wang et al., 2017) y no hay genes clonados (Wang et al., 2017).

Porcentaje de arroz integral

En el arroz se ha informado de algunas diferencias en el rendimiento de grano industrial. Es así como las variedades de arroz tipo *japonica* tienen un mayor porcentaje de arroz integral que las variedades tipo *indica*, y las variedades modernas poseen mayor porcentaje de grano integral que las variedades antiguas (Ren et al., 2016).

La herencia del rendimiento de grano integral es principalmente del tipo nuclear, con dominancia completa o parcial sobre el bajo rendimiento de grano industrial y con un bajo efecto maternal (Tan et al., 2000; Luo et al., 2014). Al respecto, la información disponible es escasa (Aluko et al., 2004); sin embargo, se han detectado dos QTLs (*qBRR3*, *qBRR5*) que tienen una alta asociación con la recuperación de arroz integral (Tan et al., 2001; Lou et al., 2009). Estos QTL´s estarían involucrados, también, en la regulación del tamaño (ancho y largo) del grano (Lou et al., 2009) y se encontrarían ligados a un par de genes candidatos que estarían controlando esta característica del grano (Ren et al., 2016).

Grano entero

El criterio de calidad industrial más ampliamente utilizado es el rendimiento porcentual de grano entero, obtenido después del procesamiento del grano e influye directamente en el precio final del producto (Bao, 2014). Este porcentaje de grano entero está influenciado por factores genéticos (variedad), agronómicos, condiciones de cosecha, secado del grano y por el proceso industrial (Zhou et al., 2015). En este sentido se ha detectado un QTL (*qHRR3*) que estaría asociado al porcentaje de grano entero y al largo del grano (Tan et al., 2001; Jiang et al., 2013). Esta información sugiere que existe una relación entre el tamaño o forma del grano y el porcentaje de grano entero obtenido en el proceso industrial.

Apariencia del grano

La apariencia del grano se refiere al aspecto externo del grano después de su proceso industrial y está asociada al tamaño (largo y ancho), la relación largo/ancho (forma), el peso y la transparencia (panza blanca) del endospermo (Bao, 2014; Zhou et al., 2015; Chen et al., 2016; Wang et al., 2017).

La apariencia del grano es una característica muy importante, pues afecta la aceptación en el mercado. En general, el consumidor prefiere un grano uniforme y translúcido (Zhao et al., 2015). Las preferencias por el tamaño y forma del grano son muy variables y dependen de cada país, región y cultura (Fitzgerald et al., 2009; Calingacion et al., 2014; Concepcion et al., 2015). Es así como en Japón, Corea, norte de China y Sri Lanka prefieren consumir un grano corto. En cambio, en el sur de China, India, Pakistán, Tailandia, y muchos países de África y América prefieren consumir un grano largo y delgado (Calingacion et al., 2014). En este aspecto se puede mencionar que la población chilena prefiere consumir, principalmente, un grano de tipo largo-ancho.

Tamaño y forma del grano

El largo, ancho y grosor del grano son usados para describir las dimensiones físicas del grano, mientras que la forma del grano se expresa mediante la relación largo/ancho (Bao, 2014).

En diversos estudios se ha identificado un amplio número de QTLs que controlan estas características a través del proceso de mapeo de poblaciones biparentales, estudios de asociación del genoma completo (´GWAS, genome-wide association studies`) y/o poblaciones naturales (Fan et al., 2006; Luo et al., 2013; Si et al., 2016).

Varios de los genes identificados en los principales QTLs han sido clonados y caracterizados funcionalmente a través de un mapeo fino. Wan et al. (2006) identificaron que el largo del grano era controlado por el gen recesivo *gl-3*. El mapeo genético de este gen sugirió que podía ser el mismo gen que controla el peso del grano, *GS3* (Li et al., 2004). Posteriormente, el gen *GS3* fue clonado (Fan et al., 2006) y se confirmó que controlaba el largo y peso del grano y que, adicionalmente, tenía un efecto menor en la determinación del ancho y espesor del grano (Wan et al., 2006; Takano-Kai et al., 2009). Finalmente, la función de este gen fue confirmada mediante transformación genética (Takano-Kai et al., 2009).

Otros genes identificados son: *GL3* (Hu et al., 2012; Zhang et al., 2012; Qi et al., 2012), *GW2* (Song et al., 2007), *GS2* (Che et al., 2015; Duan et al., 2015; Hu et al., 2015), *GS3* (Fan et al., 2006; Takano-Kai et al., 2013), *GW5* (Weng et al., 2008), *qSW5* (Shomura et al., 2008; Weng et al., 2008), *GS5* (Li et al., 2011), *GS6* (Guo et al., 2009), *GW8* (Xie et al., 2006), *DEP1* (Huang et al., 2009), *SRS1/DEP2* (Abe et al., 2010), *qGL7/qSS7* (Bai et al., 2010; Qi et al., 2012; Shao et al., 2012), *SRS3* (Kitagawa et al., 2010), *SRS5* (Segami et al., 2012), *D2* (Hong et al., 2003), *tgw11* (Oh et al., 2011), *GIF1* (Wang et al., 2008), *GL3* (Hu et al., 2012; Zhang et al., 2012; Qi et al., 2012), *OsSPL16* (Wang et al, 2012). Todos estos genes pueden proveer las bases para la selección asistida y la piramidación de genes en el desarrollo de nuevas variedades.

Recientemente, utilizando la tecnología de edición de genes, se han editado los genes *GS3*, responsables del largo del grano, y el gen *Gn1a* que controla el número de granos en cuatro variedades, lográndose granos más largos y un aumento en el peso de los granos (Fiaz et al., 2019). En forma similar, la edición de los genes *GW2*, *GW5* y *TGW6*, que regulan el peso del grano en forma negativa, produjeron un aumento en el tamaño y el peso de 1.000 granos (Li et al., 2018).

Panza blanca y translucidez del grano

La panza blanca es una característica que afecta negativamente la calidad del grano, la aceptación del arroz por los consumidores (Fitzgerald et al., 2009), el rendimiento industrial, el porcentaje de grano entero (Zhou et al., 2015) y la palatabilidad del grano cocido (Cheng et al., 2005).

El endospermo blanco opaco o con gránulos de almidón blancos, conocido como panza blanca (centro blanco), se debe principalmente a la presencia de un tipo diferente de gránulos de almidón (más largos, anchos, gruesos y pesados) empaquetados en forma diferentes, más suelta y con la presencia de espacios de aire entre ellos, al contrario del endosperma translúcido, donde los gránulos de almidón son más pequeños, tienen forma de poliedro, están fuertemente empaquetados y no presentan espacios de aire entre ellos (Gao et al., 2016; Kaneko et al., 2016; Xi et al., 2016).

Los gránulos opacos de almidón poseen una composición química diferente a las zonas translúcidas. Los granos opacos poseen menor contenido de almidón, proteínas y algunos aminoácidos comparados con los gránulos translúcidos (Xi et al., 2016). Por otro lado, la presencia de endospermo opaco presenta también un comportamiento muy diferente desde el punto de vista físico-químico, morfológico, térmico, de cocción y textura en comparación al endospermo translúcido. En relación a la calidad, las regiones con panza blanca en el grano presentan una menor calidad que se expresa en una baja consistencia de gelatinización, menor aumento de volumen y mayor dureza que las partes transparentes, y con pequeñas diferencias en las propiedades de gelatinización medidas por el ´Rapid Visco Analyzer` (RVA) (Cheng et al., 2005). Esta menor calidad del grano con panza blanca se asociaría, principalmente, a la mayor temperatura de transición y entalpía de gelatinización (ΔH) que la parte traslúcida, lo que se traduciría en mayor requerimiento de energía para la gelatinización (Cheng et al., 2005).

La formación del endosperma opaco está determinado por factores genéticos que afectan la formación de almidón y la estructura de los gránulos de almidón, y por condiciones ambientales

particulares especialmente de alta temperatura durante la etapa del llenado del grano (Tabata et al., 2007; Li et al., 2014; Murata et al., 2014; Nevame et al., 2018) y viento seco (Wada et al., 2014).

Altas temperaturas durante la madurez del grano reducen el porcentaje de grano entero, deterioran la apariencia del grano y reducen la palatabilidad debido al aumento de la panza blanca en el grano (Kobayashi et al., 2007; Tabata et al., 2007; Chun et al., 2009). Por ejemplo, temperaturas mayores a 26 °C aumentan la panza blanca y reducen el peso del grano (Tashiro y Wardlaw, 1991). Altas temperaturas durante el día o la noche aceleran el llenado de grano (Cheng et al., 2005), produciendo una mayor activación de los genes que catalizan (utilizan) el almidón, en comparación de aquellos que lo sintetizan (Yamakawa et al., 2007; Ishimaru et al., 2009; Murata et al., 2014; Kaneko et al., 2016; Nakata et al., 2017), reduciendo la calidad culinaria del arroz. Otros estudios han demostrado que las altas temperaturas promueven una reducción del contenido de amilosa y cambios en la estructura de la amilopectina (Cheng et al., 2005), proteínas, aminoácidos y algunos minerales como manganeso, potasio y magnesio (Xi et al., 2016), y una activación de la enzima α-amilasa (Iwasawa et al., 2009; Ishimaru et al., 2009; Nakata et al., 2017), lo que produciría pequeños espacios opacos que se podrían distribuir en diferentes partes del grano, reduciendo su calidad (Tashiro y Wardlaw, 1991).

En general, los arroces que crecen y tienen un llenado de grano en zonas donde predominan las altas temperaturas, presentan una mayor proporción de panza blanca en los granos, en comparación con aquellos que crecen y se desarrollan en zonas templadas (Lyman et al., 2013; Bao, 2014). Otro factor que también incide en esta característica es la presencia de vientos secos durante el proceso del llenado del grano, lo que produce un déficit de agua temporal en la planta e induce la producción de mayor porcentaje de panza blanca (Wada et al., 2014).

La panza blanca se puede presentar en diferentes sectores del grano, reduciendo su transparencia, centro (centro blanco), parte ventral y/o dorsal del grano. La transparencia del grano se evalúa con un instrumento que mide el paso de la luz a través del grano (Bao, 2014). Esta evaluación se puede utilizar para medir el área afectada por panza blanca en el endosperma, el grado de panza blanca en el endosperma, y/o el porcentaje de granos con panza blanca (Gao et al., 2016).

Diversos estudios genéticos han identificado QTLs asociados a panza blanca (Li et al., 2003a; 2003b; Wan et al., 2005; Kobayashi et al., 2007; Tabata et al., 2007; Zhou et al., 2009b; Liu et al., 2012; Mei et al., 2013; Peng et al., 2014; Wada et al., 2014; Sun et al., 2015; Chen et al., 2016; Gao et al., 2016; Zhao et al., 2016). Asimismo, varios genes candidatos han sido mapeados finamente (Zhou et al., 2009a; Guo et al., 2011; Gao et al., 2016; Zhu et al., 2018; Misra et al., 2019) y un gen mayor *chalk5* fue clonado (Li et al., 2014).

Calidad culinaria y de consumo

Se refieren a la facilidad de cocción del arroz, como también a características sensoriales tales como textura, elasticidad, pegajosidad y la sensación a la masticación del arroz cocido. Estas características están controladas por las propiedades físico-químicas del almidón, relacionadas con su contenido aparente de amilosa, la presencia de panza blanca, la temperatura de gelatinización, la consistencia del gel, y también por las propiedades de viscosidad de la pasta, absorción del agua, expansión y elongación del grano cocido.

Los parámetros de consumo, de textura, sabor y aroma son más difíciles de definir y estandarizar, ya que dependen de las preferencias de los consumidores (Cheng et al., 2005; Tian et al., 2005; Bao, 2014; Hsu et al., 2014; Wang et al., 2017). Las características de calidad y consumo del arroz son influenciadas también por factores genéticos y ambientales (Hsu et al., 2014; Misra et al., 2017; Wang et al., 2017).

Almidón

El almidón es el componente más importante del grano de arroz, ya que comprende alrededor de un 95 % del peso seco del grano (Fitzgerald et al., 2009) y es un factor determinante en la calidad culinaria y de consumo del grano. El almidón es un carbohidrato compuesto por dos polímeros de glucosa diferentes, amilosa y amilopectina (Li et al., 2015), los cuales influencian varias propiedades de calidad como viscosidad de la pasta, temperatura de gelatinización, consistencia del gel y textura del grano cocido (Bao, 2012).

Amilosa. Es una molécula moderadamente ramificada que posee entre tres y 11 ramas y una longitud promedio de cadena de unas 200 unidades de glucosa. La síntesis de la amilosa en el grano de arroz está catalizada, principalmente, por la enzima llamada almidón sintasa, unida a gránulos I (´granule-bound-starch-synthase I`, GBSSI) y esencial para la elongación de las cadenas largas; las enzimas ramificantes del almidón (´starch branching enzymes`, SBEs), importantes en la síntesis de las cadenas cortas de amilosa (Li et al., 2015); y aquellas encargadas de romper las ramificaciones (´debranching enzymes`, DBEs) (Fasahat et al., 2014). Otras enzimas que participan en la síntesis de la amilosa son las almidón sintasa, generadas por los genes SS (SSI, SSII, SSIII y SSIV) importantes en la síntesis de amilopectina, aunque su función en la síntesis de amilosa aún no está clara. Además de la enzima GBSSI que controla la producción de amilosa en el grano, existe la enzima GBSSII que está asociada a la síntesis de amilosa en hojas y en otros órganos de la planta que no tienen una función de reserva, como es el caso de la amilosa del grano (Sano, 1984). Estos genes afectan la calidad culinaria del grano de arroz, actuando en diferentes estados del llenado del grano (Sun et al., 2011).

El contenido de amilosa del grano de arroz tiene un profundo impacto en su aceptabilidad y propiedades sensoriales, como la textura del grano cocido. El contenido de amilosa está directamente relacionado con la absorción de agua, el volumen de expansión, la suavidad y la separación de los granos cocidos, e inversamente relacionado con la cohesividad, la blandura, y el brillo del grano (Lapitan et al., 2009; Biselli et al., 2014; Li et al., 2015).

El mayor contenido de amilosa está asociado también a una mayor resistencia a la fermentación del almidón, cuyo proceso se realiza en el intestino grueso del hombre, lo cual tiene varios efectos positivos en la salud, como la reducción del índice de glucosa (Fitzgerald et al., 2011). En este aspecto, se ha detectado una amplia variabilidad genética asociada al índice glicémico y varios alelos tienen una influencia diferencial en el nivel del índice glicémico. Esta situación podría permitir seleccionar genotipos y desarrollar variedades que contribuyan a mantener un bajo índice glicémico, basado en el contenido de amilosa y otras características químicas del grano (Atkinson et al., 2008; Fitzgerald et al., 2011), como el contenido de fibra dietética soluble, y tamaño y forma de las partículas de almidón. Es así como, el consumo de arroz con mayor contenido de amilosa, fibra soluble en el grano, y el uso de un tipo de cocción que no facilite la liberación del almidón, podría favorecer la mantención de un menor índice glicémico (Boers et al., 2015).

La cuantificación del contenido de amilosa es compleja, debido a que la amilosa y la amilopectina no presentan una estructura molecular única, sino varias clases de moléculas, por lo tanto, el contenido de amilosa se mide como el contenido aparente de amilosa (Fasahat et al., 2014). Variedades con el mismo contenido aparente de amilosa pueden tener propiedades culinarias y de consumo muy diferentes. Esta situación se acentúa, pues la calidad culinaria es una característica compleja determinada por múltiples factores genéticos y ambientales (Fasahat et al., 2014).

Basado en el contenido de amilosa, los granos de arroz se pueden clasificar en: granos cerosos con un contenido de amilosa entre 0 y 2 %; variedades con muy bajo contenido de amilosa (2-

a 10 %); variedades con contenido bajo (10 a 20 %), medio (20 a 25 %) y alto (> 25 %) (Juliano, 1992). Las variedades de arroz tipo *indica* se caracterizan por tener alto porcentaje de amilosa (> 25 %) siendo arroces secos, duros y con granos que se separan y endurecen fácilmente después de cocidos. Granos de variedades con porcentajes intermedios de amilosa (20 a 25 %) son blandos, pero no pegajosos (Juliano, 1971). Las variedades de tipo *japonica* se caracterizan por presentar bajo contenido de amilosa, granos más blandos, de mayor cohesión, más pegajosos y cremosos. Las variedades con bajo y muy bajo contenido de amilosa son pegajosas (Fasahat et al., 2014; Biselli et al., 2014).

La cantidad y calidad del almidón determina también usos bien específicos. Por ejemplo, las variedades *indica* con alto contenido de amilosa se utilizan, generalmente, para la fabricación de fideos, mientras que las variedades *japonica* no se pueden usar en este proceso por sí solas y se deben usar en mezcla para ajustarse a la textura de los fideos, debido a que el almidón de las variedades *japonica* presenta una lenta tasa de retrogradación, aunque posea un contenido de amilosa similar a las variedades *indica* (Lu et al., 2009).

El menor y mayor contenido de amilosa en el grano se puede explicar por la presencia de diferentes secuencias en el ADN; por ejemplo, las variedades con bajo contenido de amilosa poseen la secuencia AGTTATA y las variedades intermedias y altas la secuencia AGGTATA (Ayres et al., 1997). Sin embargo, esta diferencia en las secuencias de ADN no permite distinguir las variedades con un contenido intermedio de aquellas que poseen alto contenido de amilosa (Dobo et al., 2010).

El contenido de amilosa es una característica compleja que está controlada, principalmente, por el gen ceroso (*waxy*, *Wx*) que codifica al almidón sintasa unido al gránulo (GBSS) (Wang et al., 1995; Smith et al., 1997; He et al., 1999). El gen *Wx* está formado por 14 exones y 13 intrones (Wang et al., 1990). En este contexto, se han identificado también otros genes/QTLs (regiones del genoma) menores que estarían influyendo en el contenido de amilosa (Tan et al., 1999; He et al., 1999; Aluko et al., 2004; Zheng et al., 2008; Misra et al., 2017; Wang et al., 2017). Estudios recientes han demostrado que es posible manipular (editar) el gen responsable de la síntesis de la amilosa (*Wx*) en arroz, con el objetivo de alterar el contenido de amilosa en el grano, ya sea reduciendo su contenido (Terada et al., 2000; Zhang et al., 2011; Ma et al., 2015; Zhang et al., 2017; 2018) o aumentándolo (Sun et al., 2017).

El gen ceroso (*Wx*) posee varios alelos, Wx^a, Wx^b, que están asociados a diferentes tipos de arroz. Es así como el tipo *indica* que tiene 25 % de amilosa, posee el alelo Wx^a, en cambio el tipo *japonica,* que tiene 15 %, posee el alelo Wx^b (Sano, 1984). Las diferencias entre ambos tipos de arroz se ven reflejadas también en el contenido de almidón, tamaño del grano, entre otras características (Biselli et al., 2014). Plantas con el alelo Wx^a pueden acumular más proteínas en el endosperma durante el llenado del grano que las plantas con el alelo Wx^b (Mikami et al., 2000; Cai et al., 2000). Por otro lado, varios estudios han determinado la presencia de otros alelos en el gen *Wx*, como alelo el Wx^{op} en variedades *indica* de India, Nepal, Indonesia y China, que presentan un grano opaco, con panza blanca y contenido bajo en amilosa. También el alelo *wx* presente sólo en las variedades cerosas (Mikami et al., 2008), el alelo Wx^{in} presente en las variedades *aromatica* y *japonica* tropical con un contenido intermedio de amilosa (Dobo et al., 2010), y otros como Wx^{mq} (Sato et al., 2002) y Wx^{hp} (Liu et al., 2009a). Por otro lado, Teng et al (2012) reportaron la presencia de cinco alelos *Wx*, Wx^1, Wx^{g1}, Wx^{g2}, y Wx^{g3}, que estarían asociados a arroces glutinosos y con bajo, intermedio y alto (I y II) contenido de amilosa aparente, respectivamente.

Un estudio reciente determinó que, durante el proceso de domesticación del arroz asiático, el alelo Wx^{lv} se habría originado directamente del haplotipo ($Wx^{lv\text{-}w}$) del arroz silvestre, debido al proceso de selección artificial o un nuevo proceso de domesticación, el que luego se dividió en diferentes haplotipos. Es así como los primeros alelos que aparecieron en el arroz tipo *japonica* fueron Wx^b y Wx^{in}, los que se originaron temprano en el proceso de domesticación del haplotipo Wx^{Lv}-I. Por el contrario, los alelos Wx^a y Wx^{op} fueron seleccionados más tarde y se derivaron de los

haplotipos Wx^{lv}-II y Wx^{lv}-IV, respectivamente. Luego, una mutación nula en el alelo Wx^{b} del arroz *japonica* produjo el arroz glutinoso; sin embargo, esta misma mutación está presente en el arroz tipo *indica*, lo que confirma la presencia de introgresión desde *japonica* a *indica*. Finalmente, se plantea que el alelo Wx^{mp} se habría originado del alelo Wx^{b} (Zhang et al., 2019).

La distribución geográfica de estos alelos del gen de la amilosa señala que Wx^{lv} y Wx^{in} estarían asociados a las regiones tropicales, mientras que los alelos Wx^{a} y Wx^{b} estarían distribuidos en las zonas templadas. Además, el alelo Wx^{b} se distribuiría en las zonas de altura tales como el norte de China y Japón, mientras que el alelo Wx^{a} está asociado a áreas de mediana altura como el centro y el sur de China. Por ello, Wx^{b} habría sido seleccionado en las poblaciones de arroz *japonica* en regiones templadas, mientras el grupo *japonica* tropical mantuvo el alelo Wx^{in}, el arroz tipo *indica* el Wx^{a} y el arroz tipo *aus* mantuvo el alelo ancestral Wx^{lv}. El alelo Wx^{lv} afecta en forma importante las propiedades sensoriales del arroz, modulando el tamaño de las moléculas de amilosa (Zhang et al., 2019).

Amilopectina. Es un polímero de glucosa altamente ramificado, con un alto número de ramas cortas y de alto peso molecular (Juliano, 1971). La amilopectina juega un rol fundamental en la calidad del arroz, puesto que está asociada al proceso de gelatinización, temperatura de gelatinización de la pasta, pegajosidad y facilidad de retrogradación (Lii et al., 2004).

La amilopectina es sintetizada al menos por cuatro tipos de enzimas: la enzima almidón sintasa (SS): la enzima ramificante del almidón (BEs), la enzima desramificante del almidón (DBEs) y la enzima almidón fosforilasa (Pho), todas las cuales poseen múltiples isoformas (Tian et al., 2009), y algunas de ellas forman complejos activos con proteínas (Crofts et al., 2015).

Temperatura de gelatinización

La temperatura de gelatinización es una propiedad fisicoquímica que refleja directamente la calidad culinaria del arroz en términos del tiempo y la energía requerida para la cocción del arroz (Tian et al., 2005; Bao, 2014). La temperatura de gelatinización es el rango de temperatura donde al menos 90 % de los gránulos de almidón se hinchan irreversiblemente en agua caliente, con pérdida de su cristalinidad y birrefringencia (Martínez y Cuevas, 1989). La temperatura de gelatinización está altamente correlacionada con el valor de dispersión en álcali que refleja la facilidad de desintegración del arroz pulido en hidróxido de potasio diluido, donde el mayor grado de dispersión está asociado a una menor temperatura de gelatinización (Tian et al., 2005).

La temperatura de gelatinización varía entre 55 y 85 °C. Es un indicador del tiempo de cocción del arroz y se relaciona con la absorción de agua, el volumen de expansión y la elongación del grano cocido (Tian et al., 2005). La temperatura de gelatinización del arroz se puede clasificar como baja (63 a 68 °C), intermedia (69 a 73 °C) y alta (74 a 80 °C) (Martínez y Cuevas, 1989). Los arroces con alta temperatura de gelatinización se elongan menos, requieren más agua y tiempo de cocción que aquellos que poseen una temperatura de gelatinización baja o intermedia.

En general, el arroz *japonica* tiene un menor valor de gelatinización que las variedades de arroz tipo *indica*, debido a la constitución de su amilopectina (Sun et al., 2011). El alto contenido de amilosa y temperatura de gelatinización pueden conferir beneficios nutricionales y para la salud, los que estarían asociados a la baja digestión de la amilosa en el intestino (Wang et al., 2015).

El gen ceroso (*Wx*) afecta la temperatura de gelatinización (Tan et al., 1999; Waters et al., 2006) aunque ésta está controlada, principalmente, por el gen *alk* (*alkali degeneration locus*) que codifica a la enzima almidón sintasa soluble IIa (´soluble starch synthase IIa`, SSIIa) (Umemoto et al., 2002; He et al., 2006; Wang et al., 2007), con presencia de polimorfismos, genes modificadores (Aluko et al., 2004; Fan et al., 2006), otros genes relacionados con la síntesis de almidón (Bao et al., 2002; Tian et al., 2009) y otros factores, como la presencia de panza blanca que aumenta la energía requerida para la gelatinización (Cheng et al., 2005). El gen *alk* fue clonado (Gao et al., 2003) y su expresión

fue confirmada por medio de transformación genética (Gao et al., 2011). Aunque la temperatura de gelatinización es controlada por el gen *alk*, este gen menor también afecta en el contenido de amilosa y la consistencia del gel. Paralelo a esta situación se han identificado también varios QTLs asociados a la temperatura de gelatinización (Tian et al., 2005; Wang et al., 2017).

Textura

La textura del grano cocido es afectada por varios factores; entre ellos, el contenido aparente de amilosa (Juliano, 2003) y algunos procesos de poscosecha (Champagne et al., 2004), como la tasa de molinado (Park et al., 2001) y los métodos de cocción (Leelayuthsoontorn y Thipayarat, 2006).

Una manera indirecta de evaluar la textura del grano es a través del contenido aparente de amilosa, dada la importancia del gen *Waxy* (Tian et al., 2009; Su et al., 2011), aunque existen también genes menores/QTLs asociados a esta característica (Tian et al., 2009; Sun et al., 2011; Wang et al., 2017). Sin embargo, la consistencia del gel puede ser una medida más adecuada para evaluar la textura del grano, debido a que el mayor determinante de la consistencia del gel es la amilopectina (Tian et al., 2009). La consistencia del gel expresa la tendencia del arroz cocido a endurecerse cuando se enfría. Se puede clasificar en consistencia dura (27-35 mm), media (36-49 mm), suave o blanda (> 50 mm) (Bao, 2014). El flujo del gel es inversamente proporcional a la consistencia del gel. El mayor largo del gel corresponde a la categoría suave, en tanto que el corto a la consistencia dura (Martínez y Cuevas, 1989). La consistencia del gel es afectada también por el contenido de proteínas, lípidos, período de almacenaje del grano antes del procesamiento, y también por el tamaño de las partículas de la harina.

La investigación reciente ha demostrado que la estructura molecular del almidón (distribución y largo de las ramas) está asociada a la textura (dureza y glutinosidad) del grano cocido, independientemente del contenido de amilosa. Es así como las variedades de arroz que poseen menores pesos moleculares y mayores proporciones de cadenas largas de amilosa, tienen una textura más dura después de la cocción, en comparación a aquellas que poseen pesos moleculares mayores de amilosa y una mayor proporción de cadenas más cortas (Li et al., 2017). Adicionalmente se ha determinado que el contenido de amilopectina y las cadenas cortas de amilopectina están positivamente correlacionadas con la glutinosidad del arroz cocido, en un amplio rango de contenidos de amilosa (Li et al., 2017).

La glutinosidad aumenta con la reducción del contenido de amilosa en el grano y con un incremento de la cantidad de amilopectina en la solución, proporción de cadenas cortas de amilopectina y de menor peso molecular (Li et al., 2016). Es así como una variedad glutinosa, después de la cocción, liberará al agua más amilopectina con cadenas cortas y de mayor peso molecular que una variedad menos glutinosa que liberará más amilosa y poseerá una textura más dura (Li et al., 2016).

Viscosidad de la pasta

El gen *Wx* está fuertemente involucrado en la viscosidad de la pasta (Bao et al., 2000; Wang et al., 2007; Zheng et al., 2012). La viscosidad de la pasta se mide generalmente con el viscosímetro ´Rapid Visco-Analyser` (RVA) y puede ser usado para diferenciar la calidad de los arroces que poseen similar contenido de amilosa. El RVA simula el proceso de cocción del arroz y mide la facilidad de ruptura de los gránulos hinchados de almidón. De esta manera, indica el grado de estabilidad de los gránulos durante el proceso de cocción (Bao, 2014).

El RVA mide las siguientes propiedades: ruptura de la viscosidad (BDV), la viscosidad máxima alcanzada (PV) y la viscosidad de la masa (TV). La ruptura de la viscosidad tiene una correlación directa con la consistencia del gel. La retrogradación (SBV) se calcula como la diferencia entre la

viscosidad final (FV) y la viscosidad máxima, y exhibe el grado de retrogradación o dureza de la pasta de almidón después de enfriarse. Un SBV bajo está relacionado con la blandura y buena calidad sensorial del arroz cocido. Es así que un arroz de buena calidad, debe tener un BDV alto y SBV y FV bajos (Yan et al., 2005).

El RVA revela información funcional que resulta complementaria a aquella proporcionada por la evaluación del contenido de amilosa, ya que el proceso de calentamiento del almidón en presencia de agua, está directamente relacionada con la calidad de la cocción y, con ello, con la percepción de la calidad sensorial del arroz. El uso de esta tecnología permite evaluar los genotipos durante su proceso de selección y asegurar que la calidad de las nuevas variedades sean las que demanda el mercado.

Aroma

Se han identificado varios compuestos químicos responsables del aroma del grano en arroz, siendo el más importante el 2-acetil-1-pirrolina (2AP) (Buttery et al., 1983; 1988; Gaur et al., 2016; Wakte et al., 2017). Los altos niveles de 2AP se deben a una deficiencia en el exón 7 (Bradbury et al., 2005) o exón 2 (Shi et al., 2008) del gen que codifica la enzima betaína-aldehído deshidrogenasa (BADH2), lo que produce una acumulación de 2AP, que es el responsable del aroma (Bradbury et al., 2005; 2008).

El gen responsable del aroma en arroz Basmati y Jasmine es *BADH2* (Bradbury et al., 2005), sin embargo, se han identificado otros alelos (He y Park, 2015; Bindusree et al., 2017) y otros genes en diferentes variedades (Amarawathi et al., 2008; Fitzgerald et al., 2008). La edición del gen *Badh2* resultó en un aumento en la cantidad de 2AP y en la fragancia en el arroz (Shan et al., 2015).

Otras características

Otros parámetros, como la absorción de agua, volumen y elongación de expansión del grano cocido, también son utilizados como criterios de calidad del grano de arroz cocido. En este sentido, también se han identificado algunos QTLs relacionados con la elongación del grano (Rani et al., 2011) y con la absorción de agua y expansión del grano (Tian et al., 2005).

Composición química

El arroz es el alimento básico predominante para muchos países de Asia y el Pacífico, de América del Norte y del Sur y de África. Este cereal proporciona 20 % del suministro de energía alimentaria del mundo (FAO, 2004).

En el mundo se produce y consume una amplia variedad de tipo de arroces, entre los cuales se pueden mencionar: blanco pulido, integral, rojo, púrpura-negro (Cuadro 2).

El mayor contenido de proteínas lo presentan los granos de colores negro-púrpura, seguido del arroz rojo, integral y blanco pulido, respectivamente (Cuadro 2). El arroz rojo tiene un mayor contenido de minerales, seguido de los arroces negro-púrpura. El contenido de zinc es mayor también en el arroz rojo, a diferencia del contenido de fibra que es mayor en el arroz negro (Cuadro 2).

Cuadro 2. Composición química (g) en varios tipos de arroz, basado en 100 gramos.

Tipo	Proteína (g)	Hierro (g)	Zinc (g)	Fibra (g)
Blanco pulido	6,8	1,2	0,5	0,6
Integral	7,9	2,2	0,5	2,8
Rojo	7,0	5,5	3,3	2,0
Púrpura	8,3	3,4	2,2	1,4
Negro	8,5	3,5	-	4,9

Fuente: FAO, 2004.

Principales fracciones del grano

La elaboración del arroz con cáscara entrega diferentes fracciones como el arroz integral, arroz pulido, salvado, harinilla y cáscara. Este procedimiento rinde aproximadamente 20 % de cascarilla, 10 a 12 % de pulido (salvado y harinilla), y 65 a 70 % de endosperma. El arroz elaborado puede tener un rendimiento de 50 a 65 % de grano entero; el pulido puede alcanzar entre 10 y 12 % (afrecho 3 %, harinilla 5 a 8 %, y germen 2 %); los granos quebrados entre 15 y 20 %; y las puntillas 2 %, dependiendo de las condiciones climáticas, genéticas, agronómicas e industriales.

El proceso de elaboración involucra dos procesos (blanqueadora 1 y blanqueadora 2 o pulido). En el primer proceso se eliminan las capas correspondientes al pericarpio, tegumento y alguna parte del germen, dando origen al subproducto conocido como salvado o afrechillo. En el segundo proceso se eliminan las capas que quedan adheridas al grano y la aleurona, dando origen al subproducto conocido como pulido. El salvado o afrechillo y el pulido pueden mantenerse separados o juntos en un solo producto, dependiendo de la empresa.

El análisis químico de cada producto y subproducto señala que los principales componentes de la cáscara son la fibra cruda (41,1 %) y el extracto no nitrogenado (29,2 %). El salvado presenta un buen porcentaje de proteínas (12,5 %), grasa (13,1 %), fibra cruda (12,5 %) y un 42,0 % de extracto no nitrogenado. El pulido posee también un alto contenido de proteínas (12,5 %), grasa (11,2 %) y extracto no nitrogenado (56,1 %). Finalmente, en el arroz sin cáscara se encuentra un contenido de proteína de 8,4 % y un contenido no nitrogenado de 76,3 % (Cuadro 3).

Cuadro 3. Composición química del arroz y sus subproductos.

Composición química	Arroz y subproductos			
	Cáscara	Salvado con germen	Pulido	Arroz sin cáscara
Materia seca (%)	92,4	90,8	90,4	88,2
Proteína, N×6,25 (%)	2,8	12,5	12,5	8,4
Grasa (%)	0,8	13,1	11,8	1,7
Fibra cruda (%)	41,1	12,5	3,2	0,9
Extracto no nitrogenado (%)	29,2	42,0	56,1	76,3
Cenizas (%)	18,4	10,8	6,9	1,0

Fuente: Gómez, 1978.

La proteína de almacenaje del grano de arroz está constituida por cuatro fracciones: albúminas (9 a 11 %), globulina (7 a 15 %), prolamina (2 a 4 %) y glutelina (80 %) de acuerdo a su diferente solubilidad (Chen et al., 2018). La glutelina es el mayor componente de la proteína y está concentrada, principalmente, en el salvado. Es de más fácil digestión y posee mayor contenido de lisina, en comparación con la prolamina que representa un 5 % y está distribuida ampliamente en los diferentes componentes del grano (Yamagata et al., 1982).

El contenido de la proteína es una característica que se hereda en forma cuantitativa y está afectada por el medio ambiente (Shewry, 2007). No obstante, es importante mencionar que se han detectado QTLs para contenido de proteínas, (*qPC1*) que han sido funcionalmente caracterizados (Peng et al., 2014), y un QTL (*qCFC5*) para el contenido de grasa cruda (Liu et al., 2009b; Qin et al., 2010) y su expresión (Wang et al., 2008).

Productos y subproductos

Por otro lado, el análisis comparativo de la composición química del arroz paddy, integral, elaborado, salvado y cáscara, señala que el salvado posee el máximo contenido energético y proteico, seguido del arroz integral, arroz pulido y cáscara. Considerando la composición química, el arroz integral posee un mayor contenido energético, proteico, fibra y grasa, pero un menor contenido de carbohidratos, comparado con el arroz pulido. La comparación entre el arroz elaborado (pulido) e integral señala que el arroz integral posee mayor porcentaje de proteína, grasa, fibra y energía (Cuadro 4).

Cuadro 4. Composición química de diferentes fracciones del grano de arroz (14% humedad).

Composición	Fracciones				
	Arroz paddy	Arroz integral	Arroz elaborado	Salvado	Cáscara
Proteína cruda N×5,95 (g)	5,8-7,7	7,1-8,3	6,3-7,1	11,3-14,9	2,0-2,8
Grasa cruda (g)	1,5-2,3	1,6-2,8	0,3-0,5	15,0-29,7	0,3-0,8
Fibra cruda (g)	7,2-10,4	0,6-1,0	0,2-0,5	7,0-11,4	34,5-45,9
Ceniza cruda (g)	2,9-5,2	1,0-1,5	0,3-0,8	6,6-9,9	13,2-21,0
Carbohidratos (g)	64,0-73,0	73,0-87,0	77,0-89,0	34,0-62,0	22,0-34,0
Energía (kcal)	378	363-385	349-373	399-373	265-332
Densidad (g mL^{-1})	1,17-1,23	1,31	1,44-1,46	1,16-1,29	0,67-0,74

Fuente: Juliano, 1993.

La comparación del arroz blanco e integral crudo y cocido permite indicar que el arroz no posee colesterol. Existen sólo pequeñas diferencias en el contenido de proteínas e hidratos de carbono y sí se observa una mayor diferencia en el contenido de lípidos totales al comparar el arroz blanco e integral cocido (Cuadro 5).

Cuadro 5. Composición química del arroz blanco e integral crudo y cocido.

Composición	Arroz blanco	Arroz blanco cocido	Arroz integral	Arroz integral cocido
Energía (kcal)	370	130	367	112
Humedad (g)	10,5	68,4	11,8	73,0
Cenizas (g)	0,5	0,4	1,2	0,4
Proteínas (g)	6,8	2,7	7,5	2,3
H. de C disponibles (g)	78,9	27,8	72,7	21,7
Azúcares totales (g)	s/i	0,1	0,7	s/i
Lípidos totales (g)	0,6	0,3	3,2	0,8
Ácidos grasos saturados (g)	0,11	0,08	0,59	0,17
Ácidos grasos mono-insaturados (g)	0,20	0,09	1,05	0,30
Ácidos grasos poli-insaturados (g)	0,20	0,08	1,00	0,30
Ácidos grasos trans (g)	s/i	s/i	s/i	s/i
Colesterol (mg)	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Departamento de Agricultura de U.S.A. (USDA), Servicio de Investigación Agrícola. Base de datos composición de los alimentos. s/i: sin información.

Vitaminas y minerales

El mayor contenido de vitaminas del grupo B se concentra en el salvado al igual que el tocoferol (vitamina E). Situación similar ocurre cuando se compara el arroz integral con el arroz elaborado. La mayor concentración de calcio, hierro, zinc y fósforo se encuentra en el salvado, seguido del arroz integral (Cuadro 6).

Cuadro 6. Contenido de vitaminas y minerales de diferentes fracciones del grano de arroz. (14 % Humedad).

Vitaminas/minerales	Fracciones				
	Arroz paddy	Arroz integral	Arroz elaborado	Salvado	Cáscara
Tiamina, Vit B_1 (mg)	0,26-0,33	0,29-0,61	0,02-0,11	1,20-2,40	0,09-0,21
Riboflavina Vit B_2 (mg)	0,06-0,11	0,04-0,14	0,02-0,06	0,18-0,43	0,05-0,07
Niacina (mg)	2,9-5,6	3,5-5,3	1,3-2,4	26,7-49,9	1,6-4,2
α-Tocoferol (mg)	0,90-2,00	0,90-2,50	0,0-0,3	2,60-13,3	0
Calcio (mg)	10,0-80,0	10,0-50,0	10,0-30,0	30,0-120,0	60,0-130
Hierro (mg)	1,4-6,0	0,2-5,2	0,2-2,8	8,6-43,0	3,9-9,5
Zinc (mg)	1,7-3,1	0,6-2,8	0,6-2,3	4,3-25,8	0,9-4,0
Fósforo (mg)	0,17-0,39	0,17-0,43	0,08-0,15	1,1-2,5	0,03-0,07

Fuente: Juliano, 1993.

El contenido de vitaminas en el arroz blanco e integral crudo y cocido indica que el arroz no posee vitaminas A, C, D y B_{12} (Cuadro 7). La comparación entre el arroz blanco e integral cocido señala que

el arroz integral posee una mayor cantidad de diferentes tipos de vitaminas. El arroz integral posee vitaminas E, K, B_1 y B_2, las que están ausentes en el arroz blanco. El contenido de niacina, vitamina B_6, ácido pantoténico y folatos es mayor en el arroz integral en comparación al arroz blanco (Cuadro 7).

Cuadro 7. Contenido de vitaminas del arroz blanco e integral crudo y cocido.

Composición	Arroz blanco	Arroz blanco cocido	Arroz integral	Arroz integral cocido
Humedad (g)	10,5	68,4	11,8	73,0
Vitamina A (µg EAR)	0,0	0,0	0,0	0,0
Vitamina C (mg)	0,0	0,0	0,0	0,0
Vitamina D (µg)	0,0	0,0	0,0	0,0
Vitamina E (mg ET)	s/i	0,0	0,6	s/i
Vitamina K (µg)	s/i	0,0	0,6	s/i
Vitamina B_1 (mg)	s/i	0,0	0,5	0,1
Vitamina B_2 (mg)	0,1	0,0	0,1	0,0
Niacina (mg EN)	2,1	0,4	6,5	1,3
Vitamina B_6 (mg)	0,1	0,1	0,5	0,1
Ácido pantoténico (mg)	0,8	0,4	1,1	0,4
Vitamina B_{12} (µg)	0,0	0,0	0,0	0,0
Folatos (µg EFA)	7,0	3,0	23,0	4,0

Fuente: Departamento de Agricultura de U.S.A. (USDA), Servicio de Investigación Agrícola. Base de datos composición de los alimentos. s/i: Sin información.

La comparación del contenido de minerales en el arroz blanco e integral crudo y cocido permite señalar que el producto crudo posee un mayor nivel de minerales que el producto cocido. La comparación del arroz integral cocido posee un mayor contenido de minerales que el arroz blanco cocido, con excepción del calcio (Cuadro 8).

Cuadro 8. Contenido de minerales del arroz blanco e integral crudo y cocido.

Composición	Arroz blanco	Arroz blanco cocido	Arroz integral	Arroz integral cocido
Humedad (g)	10,5	68,4	11,8	73,0
Sodio (mg)	7,0	1,0	5,0	1,0
Potasio (mg)	77,0	35,0	250,0	79,0
Calcio (mg)	11,0	10,0	9,0	10,0
Fósforo (mg)	71,0	43,0	311,0	77,0
Magnesio (mg)	23,0	12,0	116,0	44,0
Hierro (mg)	1,6	0,2	1,3	0,5
Zinc (mg)	1,2	0,5	2,1	0,6
Cobre (mg)	0,2	0,1	0,3	0,1
Selenio (µg)	15,1	7,5	17,1	s/i

Fuente: Departamento de Agricultura de U.S.A. (USDA), Servicio de Investigación Agrícola. Base de datos composición de los alimentos. s/i: sin información.

El arroz integral puede ser una fuente importante de vitaminas y minerales; sin embargo, al pulir el arroz varios componentes nutricionales tales como la fibra dietética, vitaminas y fenoles son eliminados, reduciendo el valor nutritivo del arroz.

La deficiencia de hierro y zinc en la alimentación de la población basada en arroz, ha llevado a algunos programas de mejoramiento de arroz a desarrollar variedades con alto contenido de hierro y zinc (biofortificación) para mejorar la salud de la población (Nakandalage et al., 2016).

La información disponible permite señalar que existen diferencias genéticas en el contenido de minerales en arroz (Anandan et al., 2011; Jagadeesh et al., 2013). Sin embargo, existen escasos trabajos que hayan determinado los genes responsables de estas características.

Aminoácidos

Entre los aminoácidos analizados, la leucina, fenilalanina+tirosina y valina presentan un contenido más homogéneo al comparar todas las fracciones. El contenido de aminoácidos del arroz integral y del arroz pulido es bastante similar (Cuadro 9). La deficiencia de vitamina A en arroz llevó a desarrollar el arroz dorado en algunos programas de mejoramiento genético (Ye et al., 2000; Paine et al., 2005; Bouis y Saltzman, 2017; Giuliano, 2017).

Cuadro 9. Contenido de aminoácidos en fracciones del grano de arroz, humedad (14 %).

Aminoácidos	Fracciones				
	Arroz paddy	Arroz integral	Arroz elaborado	Salvado	Cáscara
Histidina	1,5 - 2,8	2,3 - 2,5	2,2 - 2,6	2,7 - 3,3	1,6 - 2,0
Isoleucina	3,0 - 4,8	3,4 - 4,4	3,5 - 4,6	2,7 - 4,1	3,2 - 4,0
Leucina	6,9 - 8,8	7,9 - 8,5	8,0 - 8,2	6,9 - 7,6	8,0 - 8,2
Lisina	3,2 - 4,7	3,7 - 4,1	3,2 - 4,0	4,8 - 5,4	3,8 - 5,4
Metionina +Cisteína	4,5 - 6,2	4,4 - 4,6	4,3 - 5,0	4,2 - 4,8	3,5 - 3,7
Fenilalanina +Tirosina	9,3 -10,5	8,6 - 9,3	9,3 -10,4	7,7 - 8,0	6,6 - 7,3
Treonina	3,0 - 4,5	3,7 - 3,8	3,5 - 3,7	3,8 - 4,2	4,2 - 5,0
Triptófano	3,0 - 4,5	3,7 - 3,8	3,5 - 3,7	3,8 - 4,2	4,2 - 5,0
Valina	4,6 - 7,0	4,8 - 6,3	4,7 - 6,5	4,9 - 6,0	5,5 - 7,5

Fuente: Juliano, 1993.

Estudios genéticos tendientes a identificar genes asociados a estas características, han detectado algunos QTLs responsables de la variación en el contenido de aminoácidos (Mahender et al., 2016; Bruno et al., 2017) y algunos minerales como zinc y hierro (Lu et al., 2008; García-Oliveira et al., 2008; Norton et al., 2010; Anuradha et al., 2012), arsénico, cadmio, y selenio (Norton et al., 2010) y también el efecto genético y ambiental en la reducción de la acumulación de algunos minerales en el grano (Du et al., 2013; Tang et al., 2017).

Compuestos fenólicos

La información disponible permite indicar que los compuestos fenólicos poseen efectos beneficiosos para la salud, debido a la presencia de antioxidantes naturales (Meléndez-Martínez

et al., 2004; Zhang et al., 2006; Goufo y Trindade, 2014). Normalmente las células del cuerpo humano están expuestas a oxidantes provenientes de fuentes internas y externas, por lo que los antioxidantes participan para mantener el equilibrio entre estos compuestos. El desbalance de este equilibrio produce el estrés oxidativo que causa daño en las células y los tejidos, originando productos tóxicos que pueden afectar a procesos metabólicos y genéticos importantes. Entre ellos figuran la expresión de los genes, la actividad enzimática y la interrupción del mecanismo normal de la reparación de las células, lo que finalmente aumenta el riesgo de un envejecimiento prematuro y de contraer enfermedades cardiovasculares, diabetes y cáncer (Nam et al., 2005; Shao y Bao, 2015).

En este contexto, el grano de arroz puede contribuir positivamente a la salud humana, debido a la presencia de polifenoles, minerales, fibra, vitaminas y otros fitoquímicos (Min et al., 2011; Goufo y Trindade, 2014). En el arroz se han detectado varios compuestos con actividad antioxidante tales como tocoferol, tocotrienol y oryzanol (Iqbal et al., 2005). El contenido de fenoles está controlado por factores genéticos y de manejo del grano. Entre los factores genéticos, el color del pericarpio (Hu et al., 2003; Zhou et al., 2004; Min et al., 2011) como el del grano influyen en el tipo y contenido de fenoles (Goffman y Bergman, 2004; Shao et al., 2014). Es así como el grano con un color de pericarpio claro presenta principalmente fenoles de bajo peso molecular, como el ácido ferúlico y cumárico (Goffman y Bergman, 2004; Zhou et al., 2004), a diferencia de aquellos granos que poseen pericarpio rojo o negro, donde prevalecen los fenoles con mayor peso molecular, como la cianidina y peonidina (Oki et al., 2002; Hu et al., 2003; Goffman y Bergman, 2004; Zhang et al., 2006). En granos con pericarpio rojo existe una alta correlación entre actividad antioxidante y contenido de proantocianidinas, pero en el caso de granos con pericarpio negro la correlación depende del contenido de antocianos (Oki et al., 2002; Shao et al., 2018). Generalmente, los granos con pericarpio rojo o negro presentan una mayor actividad antioxidante que aquellos granos con un pericarpio café claro (Nam et al., 2005). Por otro lado, las variedades de arroces tipo *japonica* poseen mayor contenido de fenoles que las variedades *indica* (Heuberger et al., 2010; Zhang et al., 2010; Huang y Ng, 2011).

Además de las características genéticas, el contenido de fenoles en la planta es afectado negativamente por el pulido del grano (Zhou et al., 2004), germinación del grano (Goffman y Bergman, 2004) y alta temperatura de almacenaje del grano (Tananuwong y Tangsrianugul, 2013). El pulido del grano reduce significativamente la concentración de fenoles en el grano, ya que los tegumentos contienen entre 70 y 90 % de los ácidos fenólicos totales del grano (Zhou et al., 2004), y aproximadamente 85 % de antocianos en los arroces negros (Hu et al., 2003).

Existen dos genes (*Rc* y *Rd*) responsables del color del pericarpio del grano en arroz (Sweeney et al., 2006; Furukawa et al., 2007). El gen *Rc* es responsable por el color crema del pericarpio y la cáscara del grano y, en conjunto con *Rd,* producen el color rojo del pericarpio y de la cáscara del grano. El gen *Rd* por sí sólo no tiene un fenotipo definido. El gen *Rc* codifica una proteína que permite la acumulación de proantocianidinas (Sweeney et al., 2006), mientras que el gen *Rd* produce una proteína que está involucrada en la ruta de la producción de antocianinas y proantocianidinas (Furukawa et al., 2007). En este aspecto, Yoshimura et al. (1997) identificaron dos loci *Pb* (*Prp-b*) y *Pp* (*Prp-a*) que producen el color negro del pericarpio, donde se sugiere que el gen *Pb* puede ser un mutante del gen *Ra* (Wang y Shu, 2007).

En resumen, el arroz es una fuente rica de carbohidratos y de algunas vitaminas como tiamina, riboflavina y niacina. Sin embargo, el grano pulido posee un bajo contenido de minerales como hierro, zinc y calcio, comparado con otros cereales y legumbres. El tegumento del grano de arroz es una fuente importante de proteínas, vitaminas, minerales, compuestos antioxidantes y fitoesteroles, por lo cual tiene un alto potencial para la industria de alimentos. El arroz integral provee más minerales, vitaminas, fibra y fenoles que el arroz pulido (Bao, 2014; Mahender et al., 2016).

Como el arroz no proporciona todos los nutrientes necesarios para una alimentación adecuada, es recomendable combinarlos con otros alimentos de origen animal y vegetal, como hortalizas y leguminosas de grano, para complementar los nutrientes y obtener una buena alimentación.

Referencias

Abe, Y., Mieda, K., Ando, T., et al. 2010. The *SMALL AND ROUND SEED 1* (*SRS1/DEP2*) gene is involved in the regulation of seed size in rice. Genes Genet. Syst. 85:327-339.

Aluko, G., Martínez, C., Tohme, J., et al. 2004. QTL mapping of grain quality traits from the interspecific cross *Oryza sativa* x *O. glaberrima*. Theor. Appl. Genet. 109:630-639.

Amarawathi, Y., Singh, R., Singh, A., et al. 2008. Mapping of quantitative trait loci for basmati quality traits in rice (*Oryza sativa* L.) Mol. Breed. 21:49-65.

Anandan, A., Rajiv., G., Eswaran, R., et al. 2011. Genotypic variation and relationship between quality traits and trace elements in traditional and improved rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. J. Food Sci. 76:122-130.

Anuradha, K., Agarwal, S., Rao, Y., et al. 2012. Mapping QTLs and candidate genes for iron and zinc concentration in unpolished rice of Madhukar x Swama RILs. Gene 508:233-240.

Atkinson, F., Foster-Powell, K., Brand-Miller, J. 2008. International tables of glycemic index and glycemic load values. Diabetes Care 31:2281-2283.

Ayres, N., McClung, A., Larkin, P., et al. 1997. Microsatellites and a single-nucleotide polymorphism differentiate apparent amylose classes in an extended pedigree of US rice grain germ plasm. Theor. Appl. Genet. 94:773-781.

Bai, X., Luo, L., Yan, W., et al. 2010. Genetic dissection of rice grain shape using a recombinant inbred line population derived from two contrasting parents and fine mapping a pleiotropic quantitative trait locus *qGL7*. BMC Genet. 11:16.

Bao, J. 2012. Towards understanding of the genetic and molecular basis of eating and cooking quality of rice. Cer. Foods World 57:148-156.

Bao, J. 2014. Genes and QTLs for rice grain quality improvement. p. 239-278. In Ya, W., Bao, J. (eds.) Rice-germplasm, genetic and improvement. InTech. doi:10.5772/56621.

Bao, J., Wu, Y., Hu, B., et al. 2002. QTL for rice grain quality based on a DH population derived from parents with similar apparent amylose content. Euphytica 128:317-324.

Bao, J., Zheng, X., Xia, Y., et al. 2000. QTL mapping for the paste viscosity characteristics in rice (*Oryza sativa* L.). Theor. Appl. Genet. 100:280-284.

Bindusree, G., Natarajan, P., Kalva, S., et al. 2017. Whole genome sequencing of *Oryza sativa* L. cv. Seeragasamba identifies a new fragrance allele in rice. PLoS ONE 12:e0188920.

Biselli, C., Cavalluzzo, D., Perrini, R., et al. 2014. Improvement of marker-based predictability of apparent amylose content in *japonica* rice through *GBSSI* allele mining. Rice 7:1.

Boers, H., Ten Hoom, J., Mela, D. 2015. A systematic review of the influence of rice characteristics and processing methods on postprandial glycaemic and insulinaemic responses. Br. J. Nutr. 114:1035-1045.

Bouis, H., Saltzman, A. 2017. Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. Global Food Sec. 12:49-58.

Bradbury, L., Fitzgerald, T., Henry, R., et al. 2005. The gene for fragrance in rice. Plant Biotechnol. J. 3:363-370.

Bradbury, L., Gillies, S., Brushett, D., et al. 2008. Inactivation of an aminoaldehyde dehydrogenase is responsible for fragrance in rice. Plant Mol. Biol. 68:439-449.

Bruno, E., Choi, Y-S., Chung, I., et al. 2017. QTLs and analysis of the candidate gene for amylose, protein, and moisture content in rice (*Oryza sativa* L.) 3 Biotech. 7:40.

Buttery, R., Ling, L., Juliano, B., et al. 1983. Cooked rice aroma and 2-acetyl-1-pyrroline. J. Agric. Prod. Chem. 31:823-826.

Buttery, R., Turnbaugh, J., Ling, L. 1988. Contribution of volatiles to rice aroma. J. Agric. Food Chem. 36:1006-1009.

Cai, X., Wang, Z., Xing, Y. 2000. Alteration of RNA secondary structure of rice *waxy* intron 1 caused by naturally occurred mutations. Acta Phytophysiol. Sin. 26:59-63.

Calingacion, M., Laborte, A., Nelson, A., et al. 2014. Diversity of global markets and the science required for consumer-targeted rice breeding. PLoS ONE 9:e85106.

Champagne, E.T., Thompson, J.F., Bett-Garber, K.L., et al. 2004. Impact storage of freshly harvested paddy rice on milled white rice favor. Cereal Chem. 81:444-449.

Che, R., Tong, H., Shi, B., et al. 2015. Control of grain size and rice yield by *GL2*-mediated brassinosteroid responses. Nat. Plants 2:15195.

Chen, L., Gao, W., Chen, S., et al. 2016. High-resolution QTL mapping for grain appearance traits and co-localization of chalkiness-associated differentially expressed candidate gene in rice. Rice 9:48.

Chen, P., Shen, Z., Ming, L., et al. 2018. Basis of variation in rice seed storage protein (albumin, globulin, prolamin, and glutelin) content revealed by genome-wide association analysis. Front. Plant Sci. 9:612.

Chen, Y., Wang, M., Ouwerkerk, P. 2012. Molecular and environmental factors determining grain quality in rice. Food Energy Secur. 1:111-132.

Cheng, F., Zhong, L., Zhao, N., et al. 2005. Temperature induced changes in the starch components and biosynthetic enzymes of the two varieties. Plant Growth Regul. 46:87-95.

Chun, A., Song, J., Kim., K., et al. 2009. Quality of head and chalky rice and deterioration of eating quality by chalky rice. J. Crop Sci. Biotechnol. 12:239-244.

Codex Alimentarius. 2007. Norma del Codex para el arroz. Codex Stan 198-1995. p.1-11. In Cereales, legumbres, leguminosas y productos proteicos vegetales. Organización Mundial de la Salud. FAO, Roma, Italia.

Concepcion, J., Ouk, M., Zhao, D., et al. 2015. The need for new tools and investment to improve the accuracy of selecting for grain quality in rice. Field Crop Res. 182:60-67.

Crofts, N., Abe, N., Oitome, N., et al. 2015. Amylopectin biosynthetic enzymes from developing rice seed form enzymatically active protein complexes. J. Exp. Bot. 66:4469-4482.

Dobo, M., Ayures, N., Walker, G., et al. 2010. Polymorphism in the GBSS gene affects amylose content in US and European rice germplasm. J. Cereal Sci. 52:450-456.

Du, J., Zeng, D., Wang, B., et al. 2013. Environmental effects on mineral accumulation in rice grains and identification of ecological specific QTLs. Environ. Geochem. Health 35:161-170.

Duan, P., Ni, S., Wang, J., et al. 2015. Regulation of *OsGRF4* by OsmiR396 controls grain size and yield in rice. Nat. Plants 2:15203.

Fan, C., Xing, Y., Mao, H., et al. 2006. *Gs3*, a major QTL for grain length and weight and minor QTL for grain width and thickness in rice, encodes a putative transmembrane protein. Theor. Appl. Genet. 112:1164-1171.

FAO. 2004. Organización para la alimentación y la agricultura. El arroz y la nutrición humana. Año Internacional del Arroz 2004. El arroz es vida. FAO, Roma, Italia.

Fasahat, P., Rahman, S., Ratnam, W. 2014. Genetic controls on starch amylose in wheat and rice grains. J. Genet. 93:279-292.

Fiaz, S., Ahmad, S., Ali Noor, M., et al. 2019. Applications of the CRISPR/Cas9 system for rice grain quality improvement: perspectives and opportunities. Int. J. Mol. Sci. 20:888.

Fitzgerald, M., Hamilton, R., Calingacion, M., et al. 2008. Is there a second fragrance gene in rice? Plant Biotechnol. J. 6:416-423.

Fitzgerald, M., McCouch, S., Hall, R. 2009. Not just a grain of rice: the quest for quality. Trends Plant Sci. 14:133-139.

Fitzgerald, M., Rahman, S., Resurreccion, A., et al. 2011. Identification of a major genetic determinant of glycaemic index in rice. Rice 4:66-74.

Furukawa, T., Maekawa, M., Oki, T., et al. 2007. The *Rc* and *Rd* genes are involved in proanthocyanidin synthesis in rice pericarp. Plant J. 49:91-102.

Gao, Y., Liu, C., Li, Y., et al. 2016. QTL analysis for chalkiness of rice and fine mapping of a candidate gene for *qACE9*. Rice 9:41.

Gao, Z., Zeng, D., Cheng, F., et al. 2011. *ALK*, the key gene for gelatinization temperature, is a modifier gene for gel consistency in rice. J. Integr. Plant Biol. 53:756-765.

Gao, Z., Zheng, D., Cui, X., et al. 2003. Map-based cloning of the *alk* gene, which controls the gelatinization temperature of rice. Sci. China 46:661-668.

García-Oliveira, A., Tan, L., Fu, Y., et al. 2008. Genetic identification of quantitative trait loci for contents of mineral nutrients in rice grains. J. Integr. Plant Biol. 51:84-92.

Gaur, A., Wani, S., Pandita, D., et al. 2016. Understanding the fragrance in rice. J. Rice Res. 4:1000e125.

Giuliano, G. 2017. Provitamin A biofortification of crop plants: a golden rush with many miners. Curr. Opin. Biotechnol. 44:169-180.

Goffman, F., Bergman, C. 2004. Rice kernel phenolic content and its relationship with antiradical efficiency. J. Sci. Food Agr. 84:1235-1240.

Gómez, G. 1978. Utilización de las pulidoras (polvillo) de arroz en raciones de cerdos en crecimiento y acabado. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Goufo, P., Trindade, H. 2014. Rice antioxidants: phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ-pryzanol, and phytic acid. Food Sci. Nutr. 2:74-104.

Guo, T., Liu, X., Wan, X., et al. 2011. Identification of a stable quantitative trait locus for percentage grain with white chalkiness in rice (*Oryza sativa*). J. Integr. Plant Biol. 53:598-607.

Guo, L., Ma, L., Jiang, H., et al. 2009. Genetic analysis and fine mapping of two genes for grain shape and weight in rice. J. Integr. Plant Biol. 51:45-51.

He, Y., Han, Y., Jiang, L., et al. 2006. Functional analysis of starch-synthesis genes in determining rice eating and cooking qualities. Mol. Breed. 18:277-290.

He, P., Li, S., Qian, Q., et al. 1999. Genetics analysis of rice grain quality. Theor. Appl. Genet. 98:502-508.

He, Q., Park, Y.J. 2015. Discovery of a novel fragrant allele and development of functional markers for fragrance in rice. Mol. Breed. 35:217.

Heuberger, A., Lewis, M., Chen, M., et al. 2010. Metabolomic and functional genomic analyses reveal varietal differences in bioactive compounds of cooked rice. PLoS ONE 5:e12915.

Hong, Z., Ueguchi-Tanaka, M., Umemura, K., et al. 2003. A rice brassinosteroid-deficient mutant, *ebisu dwarf2* (*d2*), is caused by a loss of function of a new member of cytochrome P450. Plant Cell 15:2900-2920.

Hsu, Y., Tseng, M., Wu, Y., et al. 2014. Genetic factors responsible for eating and cooking qualities of rice grains in a recombinant inbred population of an inter-specific cross. Mol. Breed. 34:655-673.

Hu, Z., He, H., Zhang, S., et al. 2012. A Kelch motif-containing serine/threonine protein phosphatase determines the large grain QTL trait in rice. J. Integr. Plant Biol. 54:979-990.

Hu, J., Wang, Y., Fang, Y., et al. 2015. A rare allele of *GS2* enhances grain size and grain yield in rice. Mol. Plant 8:1455-1465.

Hu, C., Zawistowski, J., Ling, W., et al. 2003. Black rice (*Oryza sativa* L. *indica*) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide in chemical and biological model systems. J. Agric. Food Chem. 51:5271-5277.

Huang, S., Ng, L. 2011. Quantification of tocopherols, tocotrienols, and gamma-oryzanol contents and their distribution in some commercial rice varieties in Taiwan. J. Agric. Food Chem. 59:11150-11159.

Huang, X., Qian, Q., Liu, Z. et al. 2009. Natural variation at the *DEP1* locus enhances grain yield in rice. Nat. Genet. 41:494-497.

Iqbal, S., Bhanger, M., Anwar, F. 2005. Antioxidant properties and components of some commercially available varieties of rice bran in Pakistan. Food Chem. 93:265-272.

Ishimaru, T., Horigane, A., Ida, M., et al. 2009. Formation of grain chalkiness and changes in water distribution in development rice caryopsis grown under high-temperature stress. J. Cereal Sci. 50:1166-1174.

Iwasawa, N., Umemoto, T., Hiratsuka, M., et al. 2009.Structural characters of milky-white rice grains caused by high temperature and shading during grain-filling. Jpn. Crop Sci. 78:322-323.

Jagadeesh, B., Krishnamurthy, R., Surekha, K., et al. 2013. Studies on high accumulation of iron and zinc contents in some selected rice genotypes. Glob. J. Biol. Biotechnol. 2:539-541.

Jiang, W., Bikard, D., Cox, D., et al. 2013. RNA-guided editing of bacterial genomes using CRISPR-Cas systems. Nat. Biotechnol. 31.233.

Juliano, B. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Sci. Today 16:334-338.

Juliano, B. 1992. Structure and function of the rice grain and its fractions. Cereal Foods World 37:772-774.

Juliano, B. 1993. Rice in human nutrition. International Rice Research Institute (IRRI)-FAO, Rome, Italy.

Juliano, B. 2003. Rice biochemistry and quality. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Kaneko, K., Sasaki, M., Kuribayashi, N., et al. 2016. Proteomic and glycomic characterization of rice chalky grains produced under moderate and high-temperature conditions in the field system. Rice 9:26.

Kitagawa, K., Kurinami, S., Oki, K., et al. 2010. A novel kinesin 13 protein regulating rice seed length. Plant Cell Physiol. 51:1315-1329.

Kobayashi, A., Genliang, B., Shenghai, Y., et al. 2007. Detection of quantitative trait loci for white-back and basal-white kernels under high temperature stress in *japonica* rice varieties. Breed. Sci. 107:107-116.

Lapitan, V., Redoña, E., Abe, T., et al. 2009. Mapping of quantitative trait loci using a double-haploid population from the cross of *indica* and *japonica* cultivars of rice. Crop Sci. 49:1620-1528.

Leelayuthssontorn, P., Thipayarat, A. 2006. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. Food Chem. 96:606-613.

Li, Y., Fan, C., Xing, Y., et al. 2011. Natural variation in *GS5* plays an important role in regulating grain size and yield in rice. Nat. Genet. 43:1266-1269.

Li, Y., Fan, C., Xing, Y., et al. 2014. *Chalk5* encodes a vacuolar H^+-translocating pyrophosphatase influencing grain chalkiness in rice. Nat. Genet. 46:398-404.

Li, H., Fitzgerald, M., Prakash, S., et al. 2017. The molecular structural features controlling stickiness in cooked rice, a major palatability determinant. Sci. Rep. 7:43713.

Li, H., Prakash, S., Nicholson, T., et al. 2016. The importance of amylose and amylopectin fine structure for textural properties of cooked rice grains. Food Chem. 196:702-711.

Li, J., Thompson, M., McCouch, S.R. 2004. Fine mapping of a grain-weight quantitative trait locus in the pericentromeric region of rice chromosome 3. Genetics 168:2187-2195.

Li, Z., Wan, J., Xia, M., et al. 2003a. Mapping of quantitative trait loci controlling physic-chemical properties of rice grains (*Oryza sativa* L.) Breed. Sci. 53:209-215.

Li, Z., Wan, J., Xia, J. 2003b. Mapping quantitative trait loci underlying appearance quality of rice grains (*Oryza sativa* L.) Acta Genet. Sin. 30:251-259.

Li, E., Wu, A., Li, J., et al. 2015. Improved understanding of rice amylose biosynthesis from advanced starch structural characterization. Rice 8:20.

Li, N., Xu, R., Duan, P., et al. 2018. Control of grain in rice. Plant Reprod. 31:237-251.

Lii, C., Lai, V., Shen, M., et al. 2004. Changes in retrogradation properties of rice starches with amylose content and molecular properties. Cereal Chem. 81:392-398.

Liu, L., Ma, X., Liu, S., et al. 2009a. Identification and characterization of a novel *Waxy* allele from a Yunnan rice landrace. Plant Mol. Biol. 71:609-626.

Liu, X., Wang, Y., Wang, S. 2012. QTL analysis of percentage of grain chalkiness in *japonica* rice (*Oryza sativa*). Genet. Mol. Res. 11:717-724.

Liu, W., Zeng, J., Jiang, G., et al., 2009b. QTL identification of crude fat content in brown rice and its genetic basis analysis using DH and two backcross populations. Euphytica 169:197-205.

Lou, J., Chen, L., Yue, G., et al. 2009. QTL mapping of grain quality traits in rice. J. Cereal Sci. 50:145-151.

Lu, K., Li, L., Zheng, X., et al. 2008. Quantitative trait loci controlling Cu, Ca, Zn, Mn, and Fe content in rice grains. J. Genet. 87:305-310.

Lu, Z., Sasaki, T., Li, Y., et al. 2009. Effect of amylose content and rice type on dynamic viscoelasticity of a composite rice starch gel. Food Hydrocolloids 23:1712-1719.

Luo, J., Liu, H., Zhou, T., et al. 2013. *An-1* encodes a basic helix-loop helix protein that regulates awn development, grain size, and grain number in rice. Plant Cell 25:3360-3376.

Luo, L., Zhang, Y., Chen, D., et al. 2014. Mapping QTL of rice hull thickness and related traits in hybrid rice Xieyou 9308. Rice Sci. 21:29-38.

Lyman, N., Jagadish, K., Nalley, et al. 2013. Neglected rice milling yield and quality underestimates economic losses from high-temperature stress. PLoS ONE 8(8):e71157.

Ma, X., Zhang, Q., Zhu, Q., et al. 2015. A robust CRISPR/Cas9 system for convenient, high-efficiency multiplex genome editing in monocot and dicot plants. Mol. Plant 8:1274-1284.

Mahender, A., Anandan, A., Pradahan, S., et al. 2016. Rice grain nutritional traits and their enhancement using relevant genes and QTLs through advanced approaches. Springer Plus 5:2086.

Martínez, C., Cuevas, F. 1989. Evaluación de la calidad culinaria y molinera del arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Mei, D., Zu, Y., Yu, Y., et al. 2013. Quantitative trait loci for grain chalkiness and endosperm transparency detected in three recombinants inbreed line populations of *indica* rice. J. Integr. Agric. 12:1-11.

Meléndez-Martínez, A., Vicario, I., Heredia, F. 2004. Importancia nutricional de los pigmentos carotenoides. Arch. Latinoam. Nutr. 54:149-154.

Mikami, L., Dung, L., Hirano, H., et al. 2000. Effects of the two most common *Wx* alleles on different genetic background in rice. Plant Breed. 119:505-508.

Mikami, I., Uwatoko, N., Ikeda, Y., et al. 2008. Allelic diversification at the *wx* locus in landraces of Asian rice. Theor. Appl. Genet. 116:979-989.

Min, B., Mcclung, A., Chen, M. 2011. Phytochemicals and antioxidant capacities in rice brans of different color. J. Food Sci. 76:C117-C126.

Misra, G., Anacleto, R., Badoni, S., et al. 2019. Dissecting the genome-wide genetic variants of milling and appearance quality traits in rice. J. Exp. Bot. 70:5115-5130.

Misra, G., Badoni, S., Anacleto, R., et al. 2017. Whole genome sequencing-based association study to unravel genetic architecture of cooked grain width and length traits in rice. Sci. Rep. 7:12478.

Murata, K., Iyama, Y., Yamaguchi, I., et al. 2014. Identification of a novel gene (*Apq1*) from the *indica* cultivar 'Habataki' that improves the quality of grains produced under high temperature stress. Breed. Sci. 64:273-281.

Nakandalage, N., Nicolas, M., Norton, R., et al. 2016. Improving rice zinc biofortification success rate through genetic and crop management approaches in a changing environment. Front. Plant Sci. 7:764.

Nakata, M., Fukamatsu, Y., Miyashita, T., et al. 2017. High temperature-induced expression of rice α-amilases in developing endosperm produces chalky grains. Front. Plant Sci. 9:2089.

Nam, S., Choi, S., Kang, M., et al. 2005. Antioxidative, antimutagenic, and anticarcinogenic activities of rice bran extracts in chemical and cell assays. J. Agric. Food Chem. 53:816-822.

Nelson, J., McClung, A., Fjellstrom, R., et al. 2011. Mapping QTL main and interaction influences on milling quality in elite US rice germplasm. Theor. Appl. Genet. 122:291-309.

Nevame, A., Emon, R., Malek, M., et al. 2018. Relationship between high temperature and formation of chalkiness and their effects on quality of rice. BioMed Res. Int. 2018:1653721.

Norton, G., Deacon, C., Xiong, L., et al. 2010. Genetic mapping of the rice ionome in leaves and grain: identification of QTLs for 17 elements including arsenic, cadmium, iron, and selenium. Plant Soil 329:139-153.

Oh, J., Balkunde, S., Yang, P., et al. 2011. Fine mapping of grain weight QTL, *twg11* using near isogenic lines from a cross between *Oryza sativa* and *Oryza grandiglumis*. Genes Genom. 33:259-265.

Oki, T., Masuda, M., Kobayashi, M., et al. 2002. Polymeric procyanidins as radical-scavenging components in red-hulled rice. J. Agric. Food Chem. 50:7524-7529.

Paine, J., Shipton, C., Chaggar, S., et al. 2005. A new version of golden rice with increased provitamin A content. Nat. Biotechnol. 23:482-487.

Park, J., Kim., S., Kim, K. 2001. Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice. Cereal Chem. 76:151-156.

Peng, B., Wang, L., Fan, C., et al. 2014. Comparative mapping of chalkiness components in rice using five populations across two environments. BMC Genet. 15:1-14.

Qi, P., Lin, Y., Song, X., et al. 2012. The novel quantitative trait locus *GL3.1* control rice grain size and yield by regulating Cyclin-T1;3. Cell Res. 22:1666-1680.

Qin, Y., Kim, S., Zhao, X. et al. 2010. QTL detection and MAS selection efficiency for lipid content in brown rice (*Oryza sativa* L.) Genes Genom. 32:506-512.

Qui, X., Pang, Y., Yuan, Z., et al. 2015. Genome-wide association study of grain appearance and milling quality in a worldwide collection of *indica* rice germplasm. PLoS ONE 10(12)e0145577.

Rani, N., Sivaranjani, A., Madhav, M. 2011. Identification of molecular markers for cooking quality traits of rice. Indian J. Genet. Plant Breed. 71:129-138.

Ren, D., Rao, Y., Huang, L., et al. 2016. Fine mapping identifies a new QTL for brown rice rate in rice (*Oryza sativa* L.) Rice 9:1-10.

Sano, Y. 1984. Differential regulation of waxy gene expression in rice endosperm. Theor. Appl. Genet. 68:467-473.

Sato, H., Suzuki, Y., Sakai, M., et al. 2002. Molecular characterization of *Wx-mq* a novel mutant gene for low-amylose content in the endosperm of rice (*Oryza sativa* L.) Breed. Sci. 52:131-135.

Segami, S., Kono, I., Ando, T., et al. 2012. *Small and round seed 5* gene encodes alpha-tubulin regulating seed elongation in rice. Rice 5:4.

Shan, Q., Zhang, Y., Chen K., et al. 2015. Creation of fragrant rice by targeted knockout of the *OsBADH2* gene using TALEN technology. Plant Biotechnol. J. 13:791-800.

Shao, Y., Bao, J. 2015. Polyphenol in whole rice grain: genetic diversity and health benefits. Food Chem. 180:86-87.

Shao, Y., Hu, Z., Yu, Y., et al. 2018. Phenolic acids, anthocyanins, proanthocyanidins, antioxidant activity, minerals and their correlation in non-pigmented, red, and black rice. Food Chem. 239:733-741.

Shao, G., Wei, X., Chen, M., et al. 2012. Allelic variation for a candidate gene for *GS7* responsible for grain shape in rice. Theor. Appl. Genet. 125:1303-1312.

Shao, Y., Xu, F., Sun, X., et al. 2014. Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo, and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.) J. Cereal Sci. 59:211-218.

Shewry, P. 2007. Improving the protein content and composition of cereal grain. J. Cereal Sci. 46:239-250.

Shi, W., Yang, Y., Chen, S., et al. 2008. Discovery of a new fragrance allele and the development of functional markers for the breeding of fragrance rice varieties. Mol. Breed. 22:185-192.

Shomura, A., Izawa, T., Ebana, K., et al. 2008. Deletion in a gene associated with grain size increased yields during rice domestication. Nat. Genet. 40:1023-1028.

Si, L., Chen, J., Huang, X., et al. 2016. *OsSPL13* controls grain size in cultivated rice. Nat. Genet. 48:447-456.

Smith, A., Denyer, K., Martin, C. 1997. The synthesis of the starch granule. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 48:67-87.

Song, X., Huang, W., Shi, M., et al. 2007. A QTL for rice grain width and weight encodes a previously unknown RING-type E3 ubiquitin ligase. Nat. Genet. 39:623-630.

Su, Y., Rao, Y., Hu, S., et al. 2011. Map-based cloning proves *qGC-6*, a major QTL for gel consistency of *japonica*/*indica* cross, responds by waxy in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 123:859-867.

Sun, M., Abdula, S., Lee, H., et al. 2011. Molecular aspect of good eating quality formation in *japonica* rice. PLoS ONE 6:e18385.

Sun, Y., Jiao, G., Liu, Z., et al. 2017. Generation of high-amylose rice through CRISPR/Cas9-mediated targeted mutagenesis of starch branching enzymes. Front. Plant Sci. 8:298.

Sun, W., Zhou, Q., Yao, Y., et al. 2015. Identification of genome regions and the isoamylase gene for reduced grain chalkiness in rice. PLoS ONE 10:e01222013.

Sweeney, M., Thomson, M., Pfiel, B., et al. 2006. Caught red-handed: *Rc* encodes a basic helix-loop-helix protein conditioning red pericarp in rice plant. Plant Cell 18:283-294.

Tabata, M., Hirabayashi, H., Takeuchi, Y., et al. 2007. Mapping of quantitative trait loci for the occurrence of white-back kernels associated with high temperatures during the ripening period of rice (*Oryza sativa* L.) Breed. Sci. 57:47-52.

Takano-Kai, N., Jiang, H., Kubo, T., et al. 2009. Evolutionary history of *GS3*, a gene conferring grain length in rice. Genetics 182:1323-1334.

Takano-Kai, N., Jiang, H., Powell, A. et al. 2013. Multiple and independent origins of short seeded alleles of *GS3* in rice. Breed. Sci. 63:77-85.

Tan, Y., Li, J., Yu, S., et al. 1999. The three important traits for cooking and eating quality of rice grains are controlled by a single locus in an elite rice hybrid, Shanyou 63. Theor. Appl. Genet. 99:642-648.

Tan, Y., Sun, M., Xing, Y., et al. 2001. Mapping quantitative trait loci for milling quality, protein content and color characteristics of rice using a recombinant inbred line population derived from an elite rice hybrid. Theor. Appl. Genet. 103:1037-1045.

Tan, Y., Xing, Y., Li, J., et al. 2000. Genetic bases of appearance quality of rice grains in Shanyou 63, an elite rice hybrid. Theor. Appl. Genet. 101:823-829.

Tananuwong, K., Tangsrianugul, N. 2013. Effects of storage conditions and cooking on color and antioxidant activities of organic pigmented rice. Int. J. Food Sci. Technol. 48:67-73.

Tang, X., Lowder, L., Zhang, T., et al. 2017. A CRISPR-Cpf1 system for efficient genome editing and transcriptional repression in plants. Nat. Plants 3:17018.

Tashiro, T., Wardlaw, I. 1991. The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice. Aust. J. Agric. Res. 42:485-496.

Teng, B., Zeng, R., Wang, Y., et al. 2012. Detection of allele variation at the *Wx* locus with single-segment substitution lines in rice (*Oryza sativa* L.) Mol. Breed. 30:583-595.

Terada, R., Nakajima, M., Isshiki, M., et al. 2000. Antisense waxy genes with highly active promoters effectively suppress waxy gene expression in transgenic rice. Plant Cell Physiol. 41:881-888.

Tian, R., Jian, G., Shen, L., et al. 2005. Mapping quantitative trait loci underlying the cooking and eating quality of rice using a DH population. Mol. Breed. 15:117-124.

Tian, Z., Qian, Q., Liu, Q., et al. 2009. Allelic diversities in rice starch biosynthesis lead to a diverse array of rice eating and cooking qualities. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106:21760-21765.

Umemoto, T., Yano, M., Satoh, H., et al. 2002. Mapping of a gene responsible for the difference in amylopectin structure between *japonica*-type and *indica*-type rice varieties. Theor. Appl. Genet. 104:1-8.

United States International Trade Commission. 2015. Rice classification and quality attributes. p. 32-34. In Rice: Global Competitiveness of the U.S. Industry. Publication N° 4530 Investigation N° 332-549.

Wada H., Masumoto-Kubo, C., Gholipour, Y., et al. 2014. Rice chalky ring formation caused by temporal reduction in starch biosynthesis during osmotic adjustment under Foehn-induced dry wind. PLoS ONE 9:e1110374.

Wakte, K., Zanan, R., Hinge, V., et al. 2017. Thirthy-three years of 2-acetyl-1-pyrrolin3, a principal basmati aroma compound in scented rice (*Oryza sativa* L.): a status review. J. Sci. Food Agric. 97:384-395.

Wan, X., Wan, J., Jiang, L., et al. 2006. QTL analysis for rice grain length and fine mapping of an identified QTL with stable and major effects. Theor. Appl. Genet. 112:1258-1270.

Wan, X., Wan, J., Weng, J., et al. 2005. Stability of QTLs for rice grain dimension and endosperm chalkiness characteristics across eight environments. Theor. Appl. Genet. 110:1334-1346.

Wang, L., Liu, W., Xu, Y., et al. 2007. Genetic basis of 17 traits and viscosity parameters characterizing the eating and cooking quality of rice grain. Theor. Appl. Genet. 115:463-476.

Wang, X., Pang, Y., Zhang, J., et al. 2017. Genome-wide and gene-based association mapping for rice eating and cooking characteristics and protein content. Sci. Rep. 7:17203.

Wang, G., Shu, Q. 2007. Fine mapping and candidate gene analysis of purple pericarp gene Pb in rice (*Oryza sativa* L.) Chinese Sci. Bull. 52:3097-3104.

Wang, K., Wambugu, P., Zhang, B., et al. 2015. The biosynthesis, structure and gelatinization properties of starches from wild and cultivated African rice species (*Oryza barthii* and *Oryza glaberrima*). Carbohydr. Polym. 129:92-100.

Wang, E., Wang, J., Zhu, X., et al. 2008. Control of rice grain-filling and yield by a gene with a potential signature of domestication. Nat. Genet. 40:1370-1374.

Wang, Z., Wu, Z., Xing, Y., et al. 1990. Nucleotide sequence of rice *waxy* gene. Nucleic Acid Res. 18:5898.

Wang, S., Wu, K., Yuan, Q., et al. 2012. Control of grain size and quality by *OsSPL16* in rice. Nat. Genet. 44:950-954.

Wang, Z., Zheng, F., Shen, G., et al. 1995. The amylose content in rice endosperm is related to the post-transcriptional regulation of the *waxy* gene. Plant J. 7:613-622.

Waters, D., Henry, R., Reinke, R., et al. 2006. Gelatinization temperature of rice explained by polymorphism starch synthase. Plant Biotechnol. J. 4:115-122.

Weng, J., Gu, S., Wan, X., et al. 2008. Isolation and initial characterization of *gw5*, a major QTL associated with rice grain width and weight. Cell Res. 18:1199-1209.

Xi, M., Zhao, Y., Lin, Z., et al. 2016.Comparison of physiological characteristics between white-belly and white-core rice grains. J. Cereal Sci. 69:392-397.

Xie, X., Song, M., Jin, F., et al. 2006. Fine mapping of a grain weight quantitative trait locus on ice chromosome 8 using near-isogenic lines derived from a cross between *Oryza sativa* and *Oryza rufipogon*. Theor. Appl. Genet. 113:885-894.

Yamagata, H., Sugimoto, T., Tanaka, K., et al. 1982. Biosynthesis of storage proteins in developing rice seeds. Plant Physiol. 70:1094-1100.

Yamakawa, H., Hirose, T., Kuroda, M., et al. 2007. Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. Plant Physiol. 144:258-277.

Yan, C., Li, X., Zhang, R., et al. 2005. Performance and inheritance of rice starch RVA profile characteristics. Rice Sci. 12:39-47.

Ye, X., Al-Babili, S., Kloti, A., et al. 2000. Engineering the Provitamin A (ß-carotene) biosynthetic patway into (carotenoid-free) rice endosperm. Science 287:303-305.

Yoshimura, A., Ideta, O., Iwata, N. 1997. Linkage map of phenotype RFLP markers in rice. Plant Mol. Biol. 35:49-60.

Zhang, G., Cheng, Z., Zhang, X., et al. 2011. Double repression of soluble starch synthase genes *SSIIa* and *SSIIIa* in rice (*Oryza sativa* L.) uncovers interactive effects on the physicochemical properties of starch. Genome 54:448-459.

Zhang, M., Guo, B., Zhang, R., et al. 2006. Separation, purification and identification of antioxidant compositions in black rice. Agric. Sci. China 5:431-440.

Zhang, K., Raboanatahiry, N., Zhu, B., et al. 2017. Progress in genome editing technology and its application in plants. Front Plant Sci. 8:177.

Zhang, X., Wang, J., Huang, J., et al. 2012. Rare allele of *OsPPKL1* associated with grain length causes extra-large grain and a significant yield increase in rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 109:21534-21539.

Zhang J., Zhang, H., Botella, J., et al. 2018. Generation of new glutinous rice by CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the *Waxy* gene in elite rice varieties. J. Integr. Plant Biol. 60:369-375.

Zhang, M., Zhang, R., Zhang, F., et al. 2010. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties. J. Agric. Food. Chem. 58:75-87.

Zhang, C., Zhu, J., Chen, S., et al. 2019. Wx^{lv}, the ancestral allele of rice *Waxy* gene. Mol. Plant 12:1157-1166.

Zhao, X., Daygon, V., McNally, K., et al. 2016. Identification of stable QTLs causing chalk in rice grains in nine environments. Theor. Appl. Genet. 129:141-153.

Zhao, X., Zhou, L., Ponce, K., et al. 2015. The usefulness of known genes/Qtls for grain quality traits in an *indica* population of diverse breeding lines tested using association analysis. Rice 8:29.

Zheng, X., Wu, J., Lou, X., et al. 2008. The QTL analysis on maternal and endosperm genome and their environmental interactions for characters of cooking quality in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 116:335-342.

Zheng, T., Xu, J., Li, Z., et al. 2007. Genomic regions associated with milling quality and grain shape identified in a set of random introgression lines of rice (*Oryza sativa* L.). Plant Breed. 126:158-163.

Zheng, L., Zhang, W., Liu, S., et al. 2012. Genetics relationship between grain chalkiness, protein content, and paste viscosity properties in a backcross inbred population of rice. J. Cereal Sci. 56:153-160.

Zhou, Y., Cai, H., Xiao, J., et al. 2009b. Over-expression of aspartate aminotransferase genes in rice resulted in altered nitrogen metabolism and increased amino acid content in seeds. Theor. Appl. Genet. 118:1381-1390.

Zhou, L., Chen, L., Jiang L., et al. 2009a. Fine mapping of the grain chalkiness QTL *qPGWC-7* in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 118:581-590.

Zhou, L., Liang, S., Ponce, K., et al. 2015. Factors affecting head rice yield and chalkiness in *indica* rice. Field Crop Res. 172:1-10.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., et al. 2004. The distribution of phenolic acids in rice. Food Chem. 87:401-406.

Zhu, A., Zhang, Y., Zhang, Z., et al. 2018. Genetic dissection of *qPCG1* for a quantitative trait locus for percentage of chalky grain in rice (*Oryza sativa* L.) Front. Plant Sci. 9:1173.

Capítulo 10. Calidad del arroz en Chile

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ.

La calidad de los productos es una característica cada día más apreciada por los consumidores. En el caso del arroz la calidad está determinada por factores físicos, químicos, culinarios y nutricionales, los cuales a su vez están influenciados por factores edafoclimáticos, genéticos, agronómicos y manejo del grano posterior a la cosecha. Debido a esta situación, la calidad del grano de arroz es una característica compleja, específica a cada región o país, ya que las preferencias culturales son diferentes y pueden cambiar en el transcurso del tiempo.

Nuestro país es un caso típico de cambio de preferencia en el consumo de un tipo de arroz por otro. Es así como hasta los años 1980, el consumidor chileno consumía arroz de grano corto con alto contenido de panza blanca, representado principalmente por la variedad ´Oro` y otras similares. Esta preferencia fue cambiando paulatinamente, hacia el consumo de arroz grano largo-ancho y con un bajo porcentaje de panza blanca, cambio liderado por la introducción al cultivo de la variedad ´Diamante-INIA`.

Antecedentes históricos

Desde la introducción del cultivo del arroz al país, se consideró que la calidad física del grano era una variable importante para valorar el producto cosechado (Astorga, 1944). En este sentido, el primer estudio relacionado con la calidad del arroz (Theune, 1941) determinó que el arroz cultivado en el país, al ser una mezcla de semillas, generaba plantas con diferentes características morfológicas y agronómicas, cuyo resultado era un producto de calidad deficiente, donde los granos eran diferentes en tamaño, largo, ancho, forma y transparencia; con presencia de malezas, incluido el arroz rojo, granos verdes y partidos.

A finales de la década del 1930, a partir de 100 kg de arroz paddy se obtenían 37 kilos de arroz de grano ´bueno` (grano entero), 19 kg de grano quebrado y 6 kg de grano muy quebrado y otros productos y subproductos. El grano muy quebrado y los subproductos eran usados como materia prima en otras industrias. Basados en esta información, el rendimiento comercial de este estudio fue de 56 %, y consideraba el porcentaje de grano entero y el grano quebrado, por lo cual, el rendimiento industrial era de un 37 % al considerar sólo el porcentaje de grano entero (Opazo, 1939).

Otras evaluaciones indicaban que la elaboración del arroz produjo, en promedio, un 40 % de grano entero, 10 % de media grana, 11 % de puntas de primera, 4 % de puntas de segunda, 11 % de afrechillo, 2 % de impurezas y 22 % de cáscara (Villalobos, 1941). La empresa EGA, en 1940, señaló que la elaboración del arroz paddy rendía un 78 % de arroz integral y un 62 % de grano pulido, formado éste, sólo por un 37 % de grano entero, un 19 % de medianas y un 6 % de puntas (Astorga, 1944).

En ese entonces, no existía una definición clara de los conceptos quebrado, muy quebrado, mediana y puntas, pues no había métodos oficiales de análisis para evaluar la calidad del grano y menos una reglamentación oficial sobre la comercialización del arroz. Por ello, el rendimiento comercial se definía como el ´porcentaje total de grano pulido` obtenido con posterioridad a la elaboración del grano por la industria. Por otro lado, los parámetros considerados por la industria en la recepción del grano cosechado eran la humedad del grano, sus impurezas (arroz rojo, granos verdes, granos chupados) y su rendimiento comercial. Los límites de tolerancia de estos parámetros no estaban bien definidos, a excepción del contenido de humedad, que era de 16 % (Astorga, 1944).

Los tipos de arroz comercializados y sus características eran las siguientes:

a) Arroz sublime extra (primera calidad): 5 % máximo de grano partido, uniformidad en el tamaño, brillante y transparente (glaseado) o blanco, granos sin estrías rojas, sin impurezas, sano, sin alteraciones y comerciable.

b) Arroz sublime superior (segunda calidad): 20 % máximo de grano partido, uniformidad regular, brillante y transparente (glaseado) o blanco, granos sin estrías rojas, con tolerancia de algunas semillas de hualcacho (*Echinochloa* spp.), sano, sin alteraciones y comerciable.

c) Arroz sublime de primera (tercera calidad): 40 % máximo de granos partidos, no se exige uniformidad en el tamaño, brillante y transparente (glaseado) o blanco, granos sin estrías rojas, con tolerancia de mayores cantidades de hualcacho, sano, sin alteraciones y comerciable.

Estos arroces podían ser brillados o no, donde la venta de medianas y puntas estaba prohibida al mercado minorista. Estos tipos/calidades de arroz estaban relacionados directamente con el precio del producto a nivel del consumidor, donde este último era fijado por el gobierno a través del Comisariato General de Subsistencia y Precios (Villalobos, 1941).

Para mejorar la calidad del arroz, en la época se solicitaba introducir variedades de países que tuvieran condiciones climáticas similares a las nacionales para mejorar producción y calidad (Opazo, 1939); cosechar con porcentaje de humedad entre un 23 y un 28 %; establecer una reglamentación oficial sobre la comercialización, tipificación y estandarización del arroz paddy, elaborado y subproductos; realizar estudios agronómicos, industriales y de calidad del grano; mejorar la infraestructura de secadores, bodegas, plantas seleccionadoras, y transporte del arroz; y contar con una mayor protección y fomento del Estado e instituciones agrícolas para el desarrollo del cultivo (Astorga, 1944).

A principios de los años 1950, se planteaba que las variedades, además de tener una procedencia conocida, tenían que tener un porcentaje de pureza, poder germinativo determinado y tolerancia de granos rojos (Sotomayor, 1954). Por lo cual, era necesario establecer un sistema de certificación de semillas en que participaran los agricultores, la industria y el gobierno (Sims, 1958). Por otro lado, el proceso industrial presentaba deficiencias en la elaboración del arroz con ausencia de normas de calidad oficiales (Torrealba, 1956).

A partir de 1953 se generaron las primeras variedades de arroz desarrolladas en el país, tendientes a uniformar las características fenotípicas de las plantas (Sims, 1960; Brevis, 1963). Sin embargo, las pruebas de calidad realizadas sobre ellas, en base al test de álcali, demostraron una baja calidad culinaria (Sims y Alvarado, 1968). Por ejemplo, las variedades ´Oro`, ´Lonquén Amarillo` y ´Rendifén` poseían el máximo valor de desintegración del grano, medido por la prueba de digestión alcalina, lo que confirmaba su mala calidad (Sims y Alvarado, 1972).

El proceso industrial de elaboración del arroz generaba 45 % de arroz entero, 20 % de arroz partido, 2 % de arroz cervecero; 9 % de afrecho y 24 % de cáscara. Mejor que el porcentaje de grano entero, de 37 % a un 47 %, obtenido en la década anterior. Sin embargo, los factores que continuaban incidiendo en el bajo rendimiento industrial apuntaban a las variedades, el mal manejo del arroz en la cosecha (siega, fecha de trilla y humedad del grano), los pobres sistemas de almacenaje y secado del grano, y un deficiente proceso industrial (Brevis, 1963).

Las principales pérdidas sufridas en la molinería nacional, estaban asociadas a la presencia de malezas, cuerpos extraños, grano verde y rojo, arroz deteriorado y bajo rendimiento industrial, todo lo cual era castigado por la industria, a través de la reducción del valor del producto entregado por el agricultor.

El porcentaje de grano entero no era reconocido ni fomentado por la industria con un mayor precio, y la comercialización de las diferentes calidades de arroz pulido a nivel del consumidor se realizaba en base al porcentaje de grano entero. El Ministerio de Economía fijaba el precio de

los diferentes tipos de arroces, en base a la presencia de grano entero y partido. Basado en este criterio, la tolerancia del arroz partido en el Arroz Corriente era de hasta un 40 %, en el Arroz de Primera hasta un 35 %, y en el Grano Extra hasta 10 %, siendo los precios mayores en la medida que aumentaba el porcentaje de grano entero y disminuía el porcentaje de grano partido.

Dada esta situación, el mejoramiento de la calidad industrial del arroz debía enfrentar cambios en el contrato de los productores con la industria, que no sólo incluía el contenido de humedad del grano, sino también un premio en la calidad industrial, asociado al porcentaje de grano entero (Brevis, 1963).

En este sentido, un estudio realizado sobre las variedades ´Rendifén`, ´Gavilla` y ´Lonquén Amarillo` indicó que: a) todas las variedades tenían una mala calidad industrial y culinaria; b) el contenido de humedad de cosecha del grano, para un mejor rendimiento industrial, debía ser de un 18 %; c) la calidad industrial asociada al arroz engavillado por largo tiempo a la intemperie, bajaba la calidad; d) la entrega de grano con un porcentaje de humedad superior a 14 %, debía ser secado artificialmente; y e) si la producción de arroz de mayor calidad industrial significaba mayores gastos a los agricultores, la industria debía establecer un sistema de pago por calidad, lo que significaba modificar los contratos de compra-venta de arroz paddy y ampliar la capacidad de los equipos de secado y guarda en volumen para afrontar esta nueva realidad (Brevis, 1963).

Sólo desde principios de la década de 1960 se empezó a incorporar, entre los objetivos de los programas de mejoramiento, la calidad culinaria, el rendimiento industrial, el grano cristalino (ausencia de panza blanca) y otros. En todo caso, no había una norma ni metodologías oficiales que permitieran definir y establecer estas características en el comercio del arroz (Silva, 1964).

En aquella época, el contrato entre productores y la industria molinera consideraba los siguientes factores: humedad (%), grano verde (%), impurezas y grano rojo (%). Entre estos factores, el porcentaje de humedad del grano era considerado como el de mayor importancia, ya que el límite de recepción del grano era de 15 % (Sims y Alvarado, 1967).

La cosecha tradicional era manual e incluía el corte de las plantas con echonas, engavillado, recogida o ´encerrada` de las gavillas por medio de ´trineos` o ´carrunchos` (plataformas con barandas, montadas en piezas de madera que servían de patines para deslizarse), tirados por caballos y llevados a una ´era` o zona donde estaban las máquinas estacionarias listas para la trilla. Debido a que este proceso era muy lento, en algunos casos extremos, las gavillas podían permanecer en el campo más de 30 d antes de la trilla, lo que afectaba negativamente el rendimiento industrial. Por tal motivo, era importante el cambio del sistema de cosecha manual por el uso de la automotriz (Silva, 1964; Sims y Alvarado, 1967; 1972).

En relación al criterio de cosecha del grano, se recomendaba iniciar las faenas de desagüe de los cuadros cuando los granos de la base de la panoja habían perdido el color verde y la humedad no era mayor de 22 a 23 % para realizar la cosecha con automotriz. De esta manera se evitaba la maduración completa de la panoja antes de iniciar las actividades de la cosecha, como el segado, engavillado y el transporte de las gavillas a la trilladora estacionaria (Sims y Alvarado, 1967; 1972).

El arroz paddy, una vez elaborado, producía un 20 % de cáscara y un 80 % de grano descascarado. El grano descascarado producía un 10 % de afrechillo y un 70 % de arroz pulido. El arroz pulido producía entre 45 y 46 % de grano entero, 20 % de grano partido, 2 % de puntas y 2 a 3 % pérdidas (Sims y Alvarado, 1967, 1972; Sims, 1969).

Un estudio realizado por Silva (1964) planteó las siguientes recomendaciones para mejorar la calidad del arroz: 1) establecer un organismo del Estado mediador entre los intereses de los agricultores, industria y consumidores, para fijar los criterios de calidad; 2) reemplazar los métodos actuales de evaluación, por normas oficiales que sean de uso obligatorio para la industria; 3) incentivar la instalación de equipos de laboratorio en las industrias para evaluar calidad; 4) estandarizar oficialmente los métodos utilizados en los diferentes molinos; 5) incorporar el

concepto de calidad en la compra de arroz por parte de los molinos; 6) mejorar la presentación en aspectos de tamaño de grano, transparencia del grano y otros; 7) iniciar la cosecha del grano con humedades entre 18 y 22 %; 8) secar el grano en el molino cuando éste tenga una humedad superior a un 14 - 15 %; 9) evitar el cambio de los tipos de arroz fijados oficialmente (Dirección de Industria y Comercio) año a año y; 10) estandarizar y definir las terminologías, clases de arroz, límites de tolerancia para las diferentes categorías y utilizar una metodología uniforme para la evaluación de las impurezas como semillas de malezas, humedad, grano rojo, grano manchado, granos dañados, granos partidos, granos yesosos, tipo de grano y determinación del rendimiento industrial.

A principio de 1980 empezó a ocurrir un cambio importante en el mercado del arroz en el país que permitió la importación de diferentes tipos de arroces. Consciente de esta nueva realidad, INIA comenzó a ampliar la evaluación de germoplasma a otros tipos de grano, diferentes a los granos corto y redondeados consumidos en el país, asociado al reforzamiento del trabajo en calidad industrial, tamaño del grano y calidad culinaria (Alvarado, 1991).

Producto de este trabajo, el INIA generó dos nuevas variedades de grano pequeño, muy similares en sus características de grano ´Quella-INIA` y ´Ñiquén-INIA` (datos no mostrados), y la primera variedad de arroz nacional de grano largo-ancho y translúcido ´Diamante-INIA`. Las características de calidad de ellas se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características de calidad de grano, largo de grano elaborado, relación largo-ancho y panza blanca, en tres variedades comerciales de arroz.

Variedad	Largo (mm)	Relación (Largo-ancho)	Panza blanca (%)	Amilosa (%)	Consistencia del gel (mm)	Proteína (%)
Oro	5,4	1,7	91,4-99,5	21,0	84	6,9
Quella-INIA	5,0	1,7	35,7-68,3	21,6	84	6,5
Diamante-INIA	7,1	2,7	5,9-8,3	21,0	84	6,7

Fuente: Alvarado y Lobos, 1986.

Estas variedades mejoraron en forma importante la calidad del grano en relación a las variedades anteriores. La variedad ´Diamante-INIA` tuvo una excelente aceptación entre agricultores, industria y consumidores, lo que significó un cambio en las preferencias de los consumidores, pasando del consumo de un grano pequeño-mediano, con alto porcentaje de panza blanca, representado por las variedades ´Rendifén` y ´Oro`, a un grano largo-ancho translúcido (Alvarado, 1991) y de un mayor rendimiento industrial, representado por la variedad ´Diamante-INIA` (Alvarado, 1997).

En la tercera etapa del proceso de mejoramiento se inició una estrecha colaboración entre el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de INIA y el Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT (Alvarado, 1997). En esa oportunidad, se incluyeron nuevas características relacionadas a calidad del grano a mejorar, como la tolerancia al manchado del grano, resistencia al desgrane, contenido de amilosa y temperatura de gelatinización, manteniendo una buena calidad industrial, transparencia y un menor contenido de panza blanca (Alvarado, 1997).

La colaboración INIA-CIAT permitió al programa de arroz, reforzar su trabajo en el desarrollo de nuevas variedades de grano largo ancho, con un porcentaje de amilosa y una temperatura de gelatinización intermedia y utilizar nuevos métodos de mejoramiento como la producción de doble haploides. Uno de los productos de ese trabajo fue el desarrollo de la variedad ´Buli-INIA` que fue la primera variedad de grano largo-fino producida en el país (Alvarado et al., 1993).

Posteriormente, el Programa de Mejoramiento Genético de INIA continuó con la liberación de otras variedades de grano largo-ancho y translúcido, tales como ´Brillante-INIA` (Alvarado et al., 1997), ´Zafiro-INIA` (Cordero et al., 2010), ´Cuarzo-INIA` (Cordero et al., 2011), ´Platino-INIA` y ´Digua CI` (Paredes et al., 2019; 2020), esta última la primera variedad clearfield en el país.

Además de la preocupación por la liberación de variedades de grano largo-ancho, el programa de mejoramiento planteó el objetivo de desarrollar y liberar variedades con otro tipo de grano para satisfacer las necesidades de la población, como la variedad ´Ámbar-INIA` de grano glutinoso (Alvarado y Hernaíz, 2005) y ´Platino-INIA`, variedad de grano medio (Paredes et al., 2016) (Cuadro 2, Foto 1). ´Platino-INIA` y ´Digua CI` fueron generadas bajo una alianza pública-privada (INIA-Fondef-Tucapel- Carozzi-Basf).

Cuadro 2. Características del grano pulido de variedades comerciales de arroz.

Variedad	Tipo de grano	Apariencia del grano	Largo del grano (mm)	Relación largo/ ancho
Diamante-INIA	Largo-ancho	Translúcido	7,0 -7,2	2,7
Brillante-INIA	Largo-ancho	Translúcido	7,2 -7,6	2,9
Buli-INIA	Largo-fino	Translúcido	7,2 -7,7	3,3
Ámbar-INIA	Corto	Opaco, glutinoso	4,5 -5,0	1,7
Platino-INIA	Mediano	Translúcido	4,8 -5,0	2,1
Zafiro-INIA	Largo-ancho	Translúcido	6,9 -7,2	2,9
Cuarzo-INIA	Largo-ancho	Translúcido	6,4 -7,6	2,8
Digua CI	Largo-ancho	Translúcido	7,0 -7,3	2,9

Foto 1. Grano pulido y translúcido de la variedad ´Platino-INIA` (derecha), en comparación con ´Oro` (Izquierda), que presenta panza blanca.

Un análisis de la calidad del arroz señala que el rendimiento industrial de las nuevas variedades alcanza un 60 % de grano entero (Paredes et al., 2015b). En relación a la panza blanca, el mayor impacto se produjo con la liberación de la variedad ´Diamante-INIA`. Desde entonces, las variedades actuales han mantenido un bajo porcentaje de panza blanca, a excepción de la variedad 'Ámbar INIA' que es considerada como una variedad glutinosa. Además, todas las variedades, con excepción de ´Ámbar-INIA` poseen un contenido medio de amilosa. La temperatura de gelatinización de todas las variedades generadas es baja. La última variedad liberada, ´Digua CI`, representa una nueva categoría de variedades que, además de mantener buenas características agronómicas y de calidad de grano, posee el gen de resistencia a la familia de herbicidas de las Imidazolinonas, el cual fue traspasado desde arroz *indica* a *japonica*.

Cuadro 3. Características de calidad industrial y culinaria de variedades comerciales de arroz.

Variedad	Rendimiento industrial (%)	Panza Blanca (0-9)	Contenido de amilosa (%)	Temperatura de gelatinización (T °C)
Diamante-INIA	58-60	Baja	Intermedio	Baja
Brillante-INIA	55-67	Baja	Intermedio	Baja
Buli-INIA	50-55	Baja	Intermedio	Baja
Ámbar-INIA	65-69	opaco	Bajo	Baja
Platino-INIA	60-65	Baja	Intermedio	Baja
Zafiro-INIA	60-65	Baja	Intermedio	Baja
Cuarzo-INIA	60-65	Baja	Intermedio	Baja
Digua Cl	60-65	Baja	Intermedio	Baja

Una característica poco estudiada en las variedades chilenas de arroz es el peso específico del grano. El análisis de esta característica reveló la presencia de diferencias significativas entre algunas variedades. Dentro de las variedades de grano corto y mediano, la variedad que presentó el menor peso específico del grano paddy, medido en un volumen de 250 mL, fue ´Ámbar-INIA` relacionado también con un mayor número de granos por volumen y un menor peso de los 1.000 granos. En el caso de las variedades largo-ancho, la variedad ´Diamante-INIA` presentó el menor peso específico de grano paddy (peso total de granos), el menor número de granos y el mayor peso de los granos en relación al volumen utilizado.

En relación al grano pulido, todas las variedades de grano pequeño y medio presentaron una mayor relación peso/volumen, comparado con las variedades de grano largo-ancho. Dentro de las variedades de grano pequeño y mediano, la variedad ´Ámbar-INIA` presentó una mayor relación peso/volumen, seguido por ´Oro` y ´Platino-INIA`. Sin embargo, las variedades de grano largo-ancho no presentaron mayores diferencias en relación peso/volumen (Cuadro 4).

Cuadro 4. Características de los granos paddy y pulido de diferentes variedades de arroz evaluadas en un volumen de 200 mL.

Variedades	Tipo de grano	Grano paddy			Grano pulido		
		Peso total de granos/ vol (g)	Total de granos/ vol (°)	Peso de 1000 granos (g)	Peso total granos/ vol (g)	Total de granos/ vol (N°)	Peso de 1000 granos (g)
Oro	Corto	145,1	4.544	32,0	210,6	9.333	22,6
Platino-INIA	Medio	148,7	5.197	28,6	208,3	9.707	21,5
Ámbar-INIA	Corto-glutinoso	131,9	5.079	26,0	212,4	11.005	19,3
Diamante-INIA	Largo-ancho	136,7	3.812	35,9	204,0	8.157	25,1
Brillante-INIA	Largo-ancho	145,1	4.339	33,5	201,8	8.227	24,5
Zafiro-INIA	Largo-ancho	151,3	4.388	34,5	202,6	7.928	25,6
Cuarzo-INIA	Largo-ancho	146,3	4.275	34,2	202,1	7.947	25,4

Fuente: Paredes et al., 2015a.

Finalmente, se puede concluir que el desarrollo de las nuevas variedades ha permitido mantener un progreso constante en la calidad del grano, representado por el rendimiento industrial, porcentaje de grano entero, blancura, panza blanca, peso específico, tamaño de grano (corto, mediano, largo-ancho y largo-fino) y contenido de amilosa.

Una prospección sobre la calidad del arroz recibido en las plantas, realizado en seis comunas de la zona arrocera (Colchagua, Talca, Linares, Parral, San Carlos y Chillán) en la temporada 1995-1996, concluyó que la variedad mayoritariamente sembrada en la zona era ´Diamante-INIA` , con un 73 % de las muestras analizadas. La humedad promedio del grano recibido en las plantas fue de un 17,3 % y el mayor porcentaje de las cosechas fue realizado con automotriz, lo cual representaba un avance importante a la situación observada anteriormente (Alvarado et al.,1996).

Este estudio indicó además: 1) alta presencia de granos pelados y partidos en ´Diamante-INIA`, siendo mayor en la provincia de Ñuble; 2) el nivel de impurezas del arroz a cosecha fue bajo, siendo mayor en la provincia de Colchagua, donde no superó la tolerancia máxima de 2 %; 3) la semilla de hualcacho estuvo presente en todas las muestras, siendo mayor en la variedad 'Oro' y aumentando su presencia de sur a norte; 4) la mayoría de las muestras presentó grano verde, siendo mayor en la provincia de Ñuble, donde se superó el límite de tolerancia; 5) la mayoría de las muestras presentó diferentes tamaño de grano; 6) el 97,4 % de las muestras de la variedad 'Oro' y el 64,5 % de las muestras de ´Diamante-INIA` presentaron grano rojo; 7) el porcentaje de rendimiento comercial (grano entero y quebrado) varió entre 56,9 y 73,9 %, pero el 66 % de las muestras produjo un rendimiento comercial superior a 70 %; 8) el porcentaje de grano entero varió entre 14,9 y 61,8 %, con un promedio de 46,4 %. El mayor rendimiento industrial se obtuvo en Ñuble con un 49,1% y el más bajo en Colchagua con un 43 %. La variedad ´Diamante-INIA` presentó, en promedio, un mayor porcentaje de grano entero que la variedad ´Oro`, pero en ambas variedades se obtuvieron muestras con porcentajes de grano entero superiores a 60 % (Alvarado et al., 1996).

Otro estudio realizado en la Compañía Molinera San Cristóbal S.A. entre los años 1997 y 2005 concluyó que: a) el porcentaje de humedad promedio del grano entregado a la planta se concentró en el rango de 16 y 22 %; b) el porcentaje de grano entero promedio fue de 45,5 %, con un rango entre 30,9 y 57,8 % en el año 1997, y un promedio de 54,1 %, con un rango entre 39,5 y 61 %, en el año 2005 (Alvarado et al., 2005).

Identidad del arroz nacional

Un estudio realizado en Chile, tendiente a identificar algunas características específicas de calidad del arroz, señaló que los granos de las variedades *japonica* producidas en el país eran más blandos y suaves, y poseían un aroma y un sabor específico. Además, se mantenían blandos al enfriarse, al ser comparados con los arroces importados que fueron identificados como arroces más duros, con un sabor y aroma diferente y adquirían una consistencia más dura al enfriarse (Fundación Chile, 2002). Sin embargo, otro estudio realizado por la empresa Consultora Tironi y Asociados concluyó que los encuestados, a pesar que reconocían la importancia del arroz en la dieta, poseían un escaso conocimiento del producto chileno (Fundación Chile, 2002).

Los principales atributos asociados al arroz producido en el país fueron: bajo precio, versátil, casero, liviano, sano, nutritivo, contundente, fácil y rápido de preparar. Se reconocieron como atributos positivos las características de longitud del grano, el grado comercial y la preparación (pre-graneado), pero no se mencionó el tema del grosor ni el origen como criterio de distinción, características importantes en el arroz nacional. La percepción positiva al arroz grano largo-ancho estuvo relacionada con la obtención de un buen graneado, buena presentación visual, versatilidad de usos, resistencia al calor y capacidad de mantenerse entero (no se partía), después de la cocción. Por otro lado, el arroz corto fue identificado como un arroz resistente a la cocción, más blanco, más consistente, y más difícil de granear, ´mazamorriento` y apelmazado. El arroz

importado fue asociado con buena calidad, insípido, menos blanco, grano largo y delgado, y más limpio (Fundación Chile, 2002).

La recomendación del estudio fue realizar una campaña de educación al consumidor que permitiera transmitir las propiedades del arroz chileno, debido a que la clasificación del arroz en grado 1, 2 y 3 desperfila al arroz nacional de sus mayores atributos, largo-ancho, sabor y aroma frente al arroz importado (Fundación Chile, 2002).

Factores que afectan la calidad industrial del arroz

La calidad del grano de arroz está influenciada por factores climáticos, genéticos, agronómicos y molineros específicos (Sims y Alvarado, 1972; Alvarado y Hernaíz, 1995; 2007; Hernaíz et al., 2008).

Factor climático.

El clima puede afectar la calidad del grano, principalmente, a través de la temperatura y la precipitación, los que a su vez afectan algunas prácticas agronómicas como época de siembra, cosecha y el crecimiento y desarrollo de la planta. Las altas y/o bajas temperaturas pueden afectar indirectamente la velocidad y cambios en el estado de desarrollo de las plantas y directamente el llenado y madurez de los granos. En caso de lluvias, puede afectar la época oportuna de siembra y de cosecha del grano.

Factor genético.

La variedad es un factor clave en la obtención de una buena calidad. Actualmente, todas las variedades comerciales de arroz recomendadas poseen un buen rendimiento industrial, tamaño de grano y calidad culinaria (Alvarado y Lobos, 1986; Alvarado y Hernaíz, 2007).

Factores agronómicos

Época de siembra. Una siembra de arroz realizada en la época recomendada permite obtener un buen rendimiento y una buena calidad de grano. Atrasos en la época de siembra reducen el porcentaje de grano entero (Hernaíz et al., 2008) y en muchos casos aumenta el porcentaje de panza blanca y reduce los riesgos de una cosecha oportuna. Por otro lado, siembras tempranas permiten cosechar en un período donde las lluvias no son abundantes (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Fertilización y control de malezas. Existen escasos estudios enfocados a evaluar el efecto de la fertilización y control de malezas en la calidad del arroz. Sin embargo, un estudio realizado en diferentes localidades del país demostró que estos factores pueden afectar la calidad del grano, expresado como rendimiento industrial, panza blanca, temperatura de gelatinización y contenido de proteínas (Alvarado y Lobos, 1986).

Enfermedades. La presencia de la enfermedad conocida como pudrición del tallo en la zona de Parral, significó una pérdida importante de calidad del grano en las variedades ´Diamante-INIA` y ´Oro`. Esta enfermedad estuvo asociada a la deficiencia de potasio, por lo cual la aplicación de fertilizante potásico permitió prevenir la presencia de esta enfermedad y el deterioro de la calidad del grano (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Humedad de cosecha. La oportunidad de cosecha está determinada por el término del estado de desarrollo del grano y el contenido de humedad. La información disponible permite recomendar que la cosecha del arroz se puede realizar cuando el grano posee un contenido de humedad de entre 18 y 24 %, lo que se produce alrededor de los 44 a 52 d después de la floración, dependiendo de las condiciones climáticas. Alrededor de los 50 d después de la floración, la humedad del grano alcanza un 20 a 24 %, lo que se traduce en una buena calidad del grano elaborado (Alvarado et al., 2005; Alvarado y Hernaíz, 2007; Hernaíz et al., 2008). En general, es

posible recomendar la cosecha del arroz cuando el grano posee una humedad cercana a 18 %, dependiendo del costo del secado artificial del grano (Alvarado y Hernaíz, 2007).

Sistema de cosecha. El sistema de cosecha mecanizado es el más adecuado para la cosecha de arroz, en comparación con el sistema de cosecha semi-mecanizada o manual, debido a las pérdidas de calidad que están asociadas a la mantención del arroz cortado en el campo por un período prolongado (Alvarado y Hernaíz, 2007).

Aplicación de desecantes. El uso de estos productos reduce la calidad del grano de arroz, al disminuir el poder de germinación del grano y no acelerar el contenido de humedad del mismo (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Factores industriales. Estos factores comprenden el secado, almacenamiento y elaboración del arroz y dependen de la industria molinera.

Norma chilena para la evaluación de la calidad del arroz en el país

Actualmente, la calidad del grano de arroz se evalúa siguiendo la Norma Chilena preparada por el Instituto Nacional de Normalización, INN. Esta norma incluye tres documentos que regulan el comercio del arroz. La primera norma se refiere a la ´Metodología de ensayos y análisis necesarios para el uso del reglamento para las transacciones de arroz con cáscara` del Ministerio de Agricultura (NCh 1375.Of.88; INN, 1999). Esta disposición anula y reemplaza a la norma NCh1375. Of77, publicada el año 1977. En este aspecto, INIA publicó un ´Manual de procedimientos para la medición de la calidad industrial del arroz en Chile` que permite ayudar a estandarizar los equipos y procedimientos para la determinación de la calidad en los molinos nacionales (Cordero et al., 2011). La segunda norma actualiza los requisitos que debe cumplir el arroz con cáscara (arroz paddy) en las transacciones comerciales, según calidad (NCh 2003.Of2003; INN, 2003a). Esta disposición anula y reemplaza a la Norma NC2033.Of1999, publicada el año 2000. La tercera norma actualiza los requisitos exigibles al arroz pulido en las transacciones en base a una clasificación por grados (NCh 1359.Of2003; INN, 2003b). Esta normativa anula y reemplaza a la Norma NCh 1359.Of2001, publicada el año 2001.

Terminología y definiciones que regulan el comercio del arroz

A continuación, se presentan la terminología y las definiciones más importantes que regulan el comercio del arroz en el país, incluidos en la Norma Chilena (INN, 1999; 2003a; 2003b).

Arroz paddy, arroz cáscara o arroz natural: ´producto fisiológicamente desarrollado, maduro, que conserva las glumelas (cáscara) luego de ser cosechado`.

Arroz descascarado, brown rice o arroz integral: ´arroz del cual sólo se retiran las glumelas (cáscara), manteniéndose intactos el germen, pericarpio (capa externa) y aleurona (capa interna) del grano`.

Arroz elaborado (beneficiario): ´producto maduro que fue sometido a algún proceso de elaboración industrial`.

Arroz pulido: ´arroz que, al ser elaborado, se le retira el pericarpio, total o parcial, el germen y la mayor parte de la capa interna (aleurona), pudiendo presentar granos con estrías longitudinales a simple vista`.

Arroz brillado, perlado, glaseado u oleado: ´arroz que después de pulido, se abrillanta por fricción con aceite comestible, glucosa y talco, vaselina mineral u otros componentes aptos para consumo humano`.

Arroz glutinoso: ´arroz de variedad especial (*Oryza sativa* L.) cuyos granos tienen una apariencia blanca y opaca, que por cocción tiende a adherirse entre sí debido a que están constituidos casi íntegramente de amilopectina`.

Arroz parbolizado o sancochado: ´producto descascarado o pulido, entero o quebrado, que presenta una coloración amarilla como resultado del proceso de sancochado`

Grano entero: ´grano descascarado o pulido que presenta un largo superior o igual a ¾ partes del largo mínimo del tipo al que pertenece`.

Grano partido: ´pedazos de granos de arroz pulido cuya longitud sea menor a las ¾ partes del grano entero de la variedad utilizada`.

Media grana: ´pedazo de granos partidos que no pasan por un harnero de laboratorio con orificios circulares de 1,60 mm de diámetro y 1,0 mm de espesor de la plancha como mínimo`.

Puntas o puntillas: ´pedazos de granos de arroz pulido que pasan a través de un harnero de laboratorio de orificios de 1,6 mm de diámetro y de 1,0 mm de espesor de la plancha como mínimo`.

Granos con panza blanca: ´granos pulidos de apariencia cristalina, que presentan una mancha blanca opaca en su interior, que abarca más del 50 % del grano, y que es característico de ciertas variedades de arroz`.

Granos yesados o yesosos: ´granos enteros o pedazos de granos, descascarados o pulidos, que presentan en más de la mitad de su superficie una coloración opaca, aspecto harinoso o semejante al yeso`.

Granos verdes: ´granos descascarados, enteros o pedazos de granos fisiológicamente inmaduros, que presentan una coloración verdosa`.

Granos rojos o estriados: ´granos descascarados o pulidos que presentan coloración rojiza o con estrías de color rojo`.

Granos vanos o chupados: ´granos con cáscara que pasan por un harnero de perforaciones oblongas de 2 mm de ancho y 20 mm de largo, en línea`.

Definiciones de tipos de grano

Tipo: ´clasificación de los granos de arroz pulido, de acuerdo a su rango de tamaño`.

Tipo largo ancho: ´granos enteros cuya relación largo /ancho es menor a 3 y cuya longitud media es mayor a 6,5`.

Tipo largo delgado: ´granos enteros cuya relación largo/ancho es igual o mayor a 3 y cuya longitud media es igual o mayor a 6,5`.

Tipo mediano: ´granos enteros cuya relación largo/ancho es mayor que 2 y cuya longitud media esté comprendida entre 5 mm y 6 mm`.

Tipo corto: ´granos enteros cuya relación largo/ancho es menor que 2 y cuya longitud es menor de 5 mm`.

Definiciones de parámetros de calidad

Rendimiento de grano entero: ´cantidad de granos de arroz pulido enteros, obtenidos al final del proceso de elaboración, con un índice de blancura de 39 IB ± 1 IB. Se expresa en porcentaje de granos enteros de arroz pulido con respecto al arroz con cáscara`.

Rendimiento industrial: ´cantidad de arroz pulido, granos enteros y partidos, obtenidos al final del proceso de elaboración, con un índice de blancura de 39 IB ± 1 IB. Se expresa en porcentaje de granos enteros y partidos de arroz con respecto al arroz con cáscara, excluidas las puntas o puntillas`.

Índice de blancura: ´expresión del grado de elaboración o pulido del arroz`.

Humedad: ´porcentaje de agua contenido en la muestra tal cual`.

Calidad de grano arroz con cáscara

De acuerdo a la Norma Chilena, el arroz con cáscara presenta una sola calidad, la que debe cumplir los siguientes requisitos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Requisitos de calidad del arroz con cáscara.

Factores (% m/m, máximo)	**Grado único**
Impurezas	2,00
Grados objetables	0,01
Granos defectuosos	
Granos yesados o yesosos	1,00
Granos manchados o dañados por calor	0,00
Granos pelados y partidos	1,00
Granos contrastantes	2,00
Granos verdes	2,00
Granos rojos o estriados	0,50
Granos vanos, chupados y picados	1,00
Total de granos defectuosos (% m/m máximo)	**4,00**
Humedad (%)	**15,00**
Rendimiento industrial mínimo (%)	**48,00**

Fuente: INN, 2003a.

Método de determinación de tamaño y color del grano

Durante la temporada 2015 en el Laboratorio de Biotecnología de INIA Quilamapu, se implementó una nueva metodología para la determinación del tamaño y color del grano, que permite incrementar la precisión y velocidad del análisis, utilizando el software GrainScan (Whan et al., 2014).

Calidad de grano del arroz pulido

De acuerdo a la Norma Chilena, el arroz pulido se clasifica en tres grados de calidad: grado 1 o Extra; grado 2 o Escogido y grado 3 o Corriente, los cuales deben cumplir con diferentes requisitos (Cuadro 6).

Cuadro 6. Requisitos de los diferentes grados de arroz.

Requisito, en porcentaje en masa, máximo.	Grado		
	1	2	3
Defectos			
Granos dañados por calor y/o manchados amarillos	0,5	2,5	5,0
Granos rojos	0,5	1,0	1,5
Granos verdes y/o yesados	1,0	3,0	5,0
Granos picados	0,5	1,0	1,0
Máximo global de los defectos anteriores	2,0	7,0	12,0
Granos partidos	5,0	20,0	35,0
Puntillas	0,5	1,0	1,0
Impurezas y materias extrañas	0,5	1,0	1,5
Granos contrastantes	5	5	10
Granos de arroz con cáscara y granos de arroz descascarado, granos por 1.000 g	7	12	20
Semillas objetables, unidades por 500 g de arroz	3	6	9

Fuente: INN, 2003b.

Composición nutricional del arroz chileno

El primer estudio relacionado con la composición química del grano de arroz en el país, indicó valores muy similares en los componentes evaluados en dos selecciones de plantas y en la semilla nacional analizados. Por ejemplo, el porcentaje de proteínas fluctuó entre un 10,7 y 11,2 % y el de grasa total entre un 2 y un 2,2 % (Cuadro 7).

Cuadro 7. Composición química de dos selecciones de plantas y del arroz nacional descascarado (no pulido).

Componente	Selección 1	Selección 2	Semilla nacional
Humedad (%)	12,1	11,9	11,8
Cenizas sobre materia seca (%)	0,37	0,40	0,42
Acidez, expresada en ácido láctico (%)	0,15	0,18	0,18
Grasa (%)	2,18	2,03	1,97
Proteínas (N x 6,25) (%)	11,02	11,20	10,67
Residuo celulósico (%)	0,96	0,94	0,98
Sustancias extractivas no azoadas (%)	73,26	73,39	74,00

Fuente: Theune, 1941.

Un análisis de muestras de arroz pulido largo ancho de diferentes marcas comerciales vendidas en los supermercados el año 2019, indicó que no existían diferencias significativas para el arroz clasificado como grado 1 en las diferentes marcas comerciales analizadas (Cuadro 8).

La información nutricional del arroz largo ancho grado 1 señala que el valor energético fluctuó entre 325 y 346 Kcal, las proteínas entre 6,1 y 6,7 g; grasa total entre 0,8 y 1,3 g, hidratos de carbono disponible entre 73 y 78,5 g, azúcares totales entre 0 y 0,6 g, y sodio entre 2,2 y 2,1 mg por 100 g (Cuadro 8).

Cuadro 8. Información nutricional de arroz pulido largo ancho grado 1, de diferentes marcas comerciales vendidas en supermercados del país, basados en 100 g de arroz*.

Composición	Banquete/ Jumbo Grado 1	Miraflores Grado 1	Tucapel Grado 1	San José Grado 1
Energía (kcal)	325	335	325	346
Proteína (g)	6,2	6,7	6,2	6,1
Grasa total (g)	0,8	1,3	0,8	0,9
H. de carbono disponible (g)	73,0	74,0	73,0	78,5
Azúcares totales (g)	0,6	0,4	0,6	0,0
Sodio (g)	1,2	2,0	1,2	2,1
Fósforo (mg)	s/i	s/i	81	s/i

*Los valores presentados en el cuadro corresponden a los incluidos en la etiqueta de la marca comercial (2020).

El análisis de muestras de arroz pulido largo ancho clasificado como grado 2, de diferentes marcas comerciales vendidas en los supermercados el año 2019, indicó que no existían diferencias significativas entre ellas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Información nutricional de arroz pulido largo ancho grado 2 de diferentes marcas comerciales vendidas en supermercados del país, basados en 100 g de arroz*.

Composición	Banquete Grado 2	Miraflores Grado 2	Tucapel Grado 2
Energía (kcal)	325	325	325
Proteína (g)	6,2	6,7	6,2
Grasa total (g)	0,8	1,3	0,8
H. de Carbono disponible (g)	73,0	74,0	73,0
Azúcares totales (g)	0,6	0,4	0,6
Sodio (g)	1,2	2,0	1,2

*Los valores presentados en el cuadro corresponden a los incluidos en la etiqueta de la marca comercial (2020)

El análisis de la información nutricional del arroz integral largo ancho, provista en las diferentes marcas comerciales, señala la presencia de mayor información nutricional entregada que el arroz pulido. En general, la composición nutricional del arroz integral de tres marcas comerciales disponibles en el mercado es similar. Sin embargo, una de ellas se diferencia en los niveles de

proteína, grasa total, hidratos de carbono disponible, fibra dietética total y el contenido de sodio (Cuadro 10).

Cuadro 10. Información nutricional de arroz integral de diferentes marcas comerciales vendidas en supermercados del país, basados en 100 g de arroz largo-ancho*.

Composición	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Energía (kcal)	338	338	335
Proteína (g)	6,9	6,9	6,4
Grasa total (g)	2,3	2,3	1,8
Grasa saturada (g)	-	-	0,3
Grasa trans (g)	-	-	-
Grasa mono insaturada (g)	-	-	-
Grasa poliinsaturada (g)	-	-	-
Colesterol	-	-	-
H. de carbono disponible (g)	72,0	72,0	73,4
Azúcares totales (g)	0,6	0,6	0,8
Fibra dietética total (g)	5,1	5,1	2,6
Fibra soluble (g)	0,5	0,5	0,2
Fibra insoluble (g)	4,5	4,5	2,4
Sodio (mg)	3,0	3,0	2,0
Niacina o Vitamina B_3 (mg EN)	4,3	-	-
Vitamina B_6 (mg)	0,5	-	-
Fósforo (mg)	359	-	-
Magnesio (mg)	98	-	-

*Los valores presentados en el cuadro corresponden a los incluidos en la etiqueta de la marca comercial (2020).

El análisis del contenido de proteínas entre las variedades comerciales presentó una variación entre 6,3 y 7,1 % en las variedades de grano largo ancho, siendo similar la variación entre las variedades de grano pequeño a mediano. La variedad largo fino presentó un valor de 6,1, similar a la variedad de grano glutinoso (Cuadro 11).

Cuadro 11. Contenido de nitrógeno y proteínas en variedades de arroz de diferentes tipos de grano.

Variedades grano largo ancho o largo fino	N (%)	Proteína (% N x 6,25)	Variedades grano corto o mediano	N (%)	Proteína (% N x 6,25)
Diamante-INIA	1,09	6,8	Oro	1,13	7,1
Brillante-INIA	1,00	6,3	Ñiquén-INIA	1,12	7,0
Zafiro-INIA	1,07	6,7	Quella-INIA	1,04	6,5
Cuarzo-INIA	1,11	6,9	Platino-INIA	1,01	6,3
Digua Cl	1,13	7,1	Ámbar-INIA	0,97	6,1
Buli-INIA	0,98	6,1	-	-	-

Fuente: Paredes et al., 2015

Subproductos

Pulido. Después de ser cosechado y sometido a los procesos de molinería, el arroz produce varios subproductos, siendo uno de ellos el pulido, que incluye el salvado y el polvillo. Este subproducto tiene un alto contenido de proteína, aceite, fibra cruda, extracto no nitrogenado (Cuadro 12), vitaminas del grupo B y fósforo. Este subproducto posee también un sistema enzimático muy activo que le da bastante estabilidad durante el almacenamiento, por lo cual se podría utilizar para la extracción de aceites, elaboración de alimentos para bebés y adultos mayores (Rodríguez, 2007).

Cuadro 12. Composición química del salvado y polvillo de arroz, de la variedad ´Diamante-INIA`.

Fracciones	Proteínas (g)	Extracto etéreo (g)	Humedad (g)	Cenizas (g)	Fibra cruda (g)	Extracto no nitrogenado (g)
Pequeña	12,1	14,1	10,1	8,2	5,1	50,4
Media	12,1	15,7	10,8	7,5	7,2	46,8
Gruesa	10,7	12,3	9,1	5,6	5,9	56,4

Fuente: Rodríguez, 2007.

El análisis comparativo en la capacidad de retención de agua y aceite del pulido, indica que el nivel de retención de agua es mayor que los lípidos (Cuadro 13), aunque la retención de lípidos es lo suficientemente alta como para producir cambios en el nivel de lípidos absorbidos por los consumidores, cuando el ingrediente es parte de la dieta (Rodríguez, 2007).

La adsorción de glucosa, especialmente la fracción gruesa y media, presentan un mayor valor, lo que permite indicar que este producto podría contribuir a bajar los valores de azúcar absorbidos en el tracto digestivo (Rodríguez, 2007). Los valores de la actividad de la α-amilasa señala que la inclusión de este subproducto en la dieta podría favorecer la no digestibilidad del almidón, disminuyendo el índice glicémico de los alimentos formulados con alto contenido de almidón (Rodríguez, 2007).

Cuadro 13. Capacidad de retención de agua y aceite y efecto de la fibra dietética en la adsorción de glucosa y en la actividad de la α-amilasa del pulido. Variedad ´Diamante-INIA`.

Fracciones	Capacidad de retención de:		Adsorción de glucosa	Actividad de la α-amilasa
	Agua (ml/100 g de producto)	Aceite (ml/100 g de producto)	(mmol/L)	(mmol/L)
Pequeña	269,0	331,7	78,2	16,3
Media	361,2	416,0	70,0	15,2
Gruesa	340,0	387,0	71,2	16,0

Fuente: Rodríguez, 2007.

La incorporación de este subproducto (pulido) en la dieta de humanos, podría disminuir los niveles de colesterol para personas con enfermedades cardiovasculares, disminución de azúcar en la sangre y degradación del almidón ingerido, por lo que se podría utilizar en la formulación de alimentos para diabéticos, hipertensos y personas con sobrepeso o aquellas que deseen llevar una vida sana (Rodríguez, 2007).

Harina. Una prospección realizada en los supermercados detectó la presencia de un solo producto de origen nacional cuya composición nutricional se presenta en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Composición química de la harina de arroz nacional.

Composición	100 g
Energía (kcal)	350
Proteína (g)	5,6
Grasa total (g)	1,0
Hidratos de carbono disponible (g)	79,7
Azúcares totales (g)	1,6
Sodio (mg)	5,3

*Los valores presentados en el cuadro corresponden a los incluidos en la etiqueta de la marca comercial (2020).

La harina presentó un contenido de proteínas y un mayor contenido de sodio que el grano pulido o integral.

Composición de macro y micronutrientes en el grano de arroz

La composición promedio de N en las variedades de arroz de grano largo-ancho y largo fino fue de 1,1 %, en tanto que P registró 0,1 %, K 0,08 %, Ca menor a 0,04 %, Mg 0,02 % y S 0,06 %. En las variedades de grano corto y medio el contenido de N fue de 1,1 %, P 0,1 %, K 0,09 %, Ca menor a 0,04 %, Mg 0,03 % y S 0,06 % (Cuadro 15).

Cuadro 15. Composición de macronutrientes de variedades de grano largo-ancho y largo-fino.

Variedades	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (mg/kg)
Grano largo-ancho y largo fino						
Diamante-INIA	1,09	0,09	0,07	<0,04	0,02	0,06
Brillante-INIA	1,00	0,10	0,10	<0,04	0,02	0,05
Zafiro-INIA	1,07	0,10	0,07	<0,04	0,02	0,06
Cuarzo-INIA	1,11	0,10	0,08	<0,04	0,02	0,06
Digua Cl	1,13	0,09	0,07	<0,04	0,02	0,07
Promedio	**1,08**	**0,10**	**0,08**	**<0,04**	**0,02**	**0,06**
Buli-INIA	0,98	0,11	0,10	<0,04	0,03	0,06
Grano corto y medio						
Oro	1,13	0,11	0,09	<0,04	0,03	0,07
Ñiquén-INIA	1,12	0,09	0,07	<0,04	0,02	0,06
Quella-INIA	1,04	0,11	0,10	<0,04	0,03	0,06
Platino-INIA	1,01	0,11	0,09	<0,04	0,03	0,06
Promedio	**1,08**	**0,11**	**0,09**	**<0,04**	**0,03**	**0,06**
Ámbar-INIA	0,97	0,12	0,12	<0,04	0,04	0,05

Fuente: Becerra et al., 2015.

La composición promedio de Na en el arroz de grano largo-ancho fue de 57 %, Cu 3,5 %, Mn 12,8 %, Zn 16,2 % y B 1,2 %. En las variedades de grano corto y medio el contenido de Na fue 63,3 %, Cu 3,22 %; Fe 15,9 %, Mn 15,9 %, Zn 16,5 % y B 0,9 % (Cuadro 16).

Cuadro 16. Composición de micronutrientes de variedades de grano largo-ancho y largo-fino.

Variedades	Na	Cu	Mn	Zn	B
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
Grano largo-ancho y largo fino					
Diamante-INIA	61,89	3,87	12,38	16,84	1,18
Brillante-INIA	55,17	3,09	11,30	14,06	1,64
Zafiro-INIA	56,09	3,31	13,19	15,96	0,85
Cuarzo-INIA	55,49	3,93	13,87	16,40	1,41
Digua Cl	56,53	3,38	13,20	17,60	0,85
Promedio	**57,03**	**3,52**	**12,79**	**16,17**	**1,19**
Buli-INIA	59,20	2,86	13,53	16,99	1,13
Grano corto y medio					
Oro	61,61	3,74	19,11	18,75	1,28
Ñiquén-INIA	66,80	3,70	15,63	15,75	0,82
Quella-INIA	60,07	3,02	14,83	18,81	0,72
Platino-INIA	64,78	2,41	14,11	12,58	0,85
Promedio	**63,32**	**3,22**	**15,92**	**16,47**	**0,92**
Ámbar-INIA	74,07	2,62	19,52	16,07	1,02

Fuente: Becerra et al., 2015.

En resumen, es importante considerar los características de calidad que el consumidor y la industria chilena requieren para el desarrollo de nuevas variedades como, tamaño de grano, porcentaje de grano entero, transparencia, temperatura de gelatinización, contenido de amilosa, entre otros. En este punto, también se debe tener en cuenta la introducción de material genético desde los países mediterráneos, quienes han desarrollado germoplasma con características similares al requerimiento nacional.

Referencias

Alvarado, R. 1991. Mejoramiento de arroz en Chile. p. 51-61. En Puignau, J. (ed.) Dialogo XXXIII Mejoramiento de Arroz. Reunión sobre mejoramiento de Arroz en el Cono Sur. Goiana, GO, Brasil. 17-21 Julio 1989. IICA-PROCISUR. Montevideo, Uruguay.

Alvarado, R. 1997. Mejoramiento de arroz en Chile y utilización de la selección recurrente. p. 117-123. En Guimaraes, E. (ed.) Selección recurrente en arroz. Embrapa, Fundación Polar, CIRAD-CA, CIAT, Cali, Colombia.

Alvarado, R., Cobo, G., Hernaíz, S. 2005. Avances de la calidad industrial del arroz en Chile. Tierra Adentro nov-dic: 40-42.

Alvarado, R., Grau, P., Martínez, C. et al. 1993. Buli-INIA, variedad de arroz de grano fino. Agric. Téc. (Chile) 53:89-90.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 1995. Manual de producción de arroz. Ministerio de Agricultura, Programa de Reconversión de Suelos Arroceros. Serie Quilamapu N°62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R. Hernaíz, S. 2005. Ámbar-INIA, nuevo cultivar de arroz de grano corto y muy bajo contenido de amilosa. Agric. Téc. (Chile) 65:101-104.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2007. Calidad industrial del grano. p.39-48. En Alvarado, R. (ed.) Arroz. Manejo tecnológico. Boletín INIA N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S., Gómez, A. et al. 1996. Evaluación de la calidad industrial del arroz en Chile. 1995/1996. Convenio INIA-ODEPA. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu. Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S., Gómez, A., et al. 1997. Brillante-INIA, nueva variedad de arroz con grano largo y translúcido. Agric. Téc. (Chile) 57:221.223.

Alvarado, R., Lobos, C. 1986. Calidad del arroz. Caracterización de tres variedades. Agric. Téc. (Chile) 46:9-14.

Astorga, M. 1944. Elaboración industrial Arroz Nacional. 129 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. 2015. Composición química de las variedades comerciales de arroz en Chile. 66 Congreso de la Sociedad Agronómica de Chile, Valdivia.

Brevis, O. 1963. Influencia de la variedad y época de cosecha en el rendimiento industrial del arroz (*Oryza sativa*). 125 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.

Cordero, K., Hernaíz, Z., Saavedra, F., et al. 2010. Zafiro INIA. Arroz, grano largo, alto rendimiento de campo y gran calidad industrial. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Cordero, K., Hernaíz, Z., Saavedra, F., et al. 2011. Cuarzo-INIA. Nueva variedad de arroz grano largo ancho. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Fundación Chile. 2002. Arroz chileno: determinación de factores diferenciadores de calidad. Informe de consultoría. Convenio de gestión: Subsecretaria de Agricultura y Fundación Chile. Fundación Chile, Santiago, Chile.

Hernaíz, S., Alvarado, R., Saavedra, F., et al. 2008. Calidad industrial del arroz. Un factor importante en la modernización del cultivo. Cartilla N°1. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Fundación para la Innovación Agraria, FIA, Sindicato Agricultores de Ñiquén, Red del Arroz VII Región, Chillán, Chile.

INN. 1999. Arroz con cáscara-métodos de ensayo y análisis. Norma chilena oficial NCh 1375.Of88. Primera edición 1989, Reimpresión, 1999. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2003a. Arroz con cáscara (arroz paddy)-requisitos. Norma chilena oficial NCh 2033.Of2003. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2003b. Arroz pulido-terminología, clasificación y requisitos generales. Norma chilena oficial NCh 1359.Of2003. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

Opazo, R. 1939. Arroz (*Oryza sativa* L.) p. 551-567. En Agricultura. Monografía cultural de las principales plantas agrícolas susceptibles de cultivarse en Chile. Tomo II. Talleres Gráficos La Nación, Santiago, Chile.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2015a. Determinación de los componentes de la industrialización y calidad de las variedades de arroz comercializadas en el país. 66 Congreso de la Sociedad Agronómica de Chile, Valdivia.

Paredes, M., Becerra, V., Vega, A. 2015b. Variedades tradicionales desarrolladas y recomendadas. p. 37-39. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) En Producción de arroz: buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu, Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, Fondef, Empresa Tucapel S.A., Empresa Carozzi S.A., BASF Chile. 1005p.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2016. Platino-INIA. Nueva variedad de arroz grano medio. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2019. Digua Cl., primera variedad de arroz Clearfield para Chile. p. 18-25. En Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. (eds.) Arroz sustentable: Sistema de producción de arroz Clearfield. Boletín INIA N°397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu, Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, Fondef, Empresa Tucapel S.A., Empresa Carozzi S.A. 52p.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2020. Digua CL. Nueva variedad de arroz grano largo ancho. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Rodríguez, M. 2007. Determinación de la composición química y propiedades físicas y químicas del pulido de arroz (*Oryza sativa* L.). Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias de los Alimentos. Escuela de Ingeniería en Alimentos. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile. 44p.

Silva, F. 1964. Rendimiento industrial y calidad culinaria de líneas puras de arroz nacional. 142 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.

Sims, G. 1958. Esperanzas efectivas para el sembrador de arroz. Plan de Desarrollo Agrícola e Higiene Rural de Maule, Ñuble y Concepción. Plan Chillán. Año IV (12): 2-6.

Sims, G. 1960. Nuevas variedades de arroz para Chile. Cartilla N°2. 5 p. Departamento de Investigaciones Agrícolas, Estación Experimental de Chillán, Chillán, Chile.

Sims, G. 1969. El cultivo del arroz. El Campesino 12: 44-71.

Sims, G. 1985. Arroz (*Oryza sativa*). p. 293-300. En Agenda del salitre. Sociedad Química y Minera de Chile. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.

Sims, G., Alvarado, R. 1967. Los métodos de cosecha del arroz en Chile y sus consecuencias. Simiente 37:12-15.

Sims, G., Alvarado, R. 1968. Mejoramiento del arroz en Chile. Simiente 38:19-22.

Sims, G., Alvarado, R. 1972. Manual del arroz. Boletín Técnico N°54. Servicio Agrícola y Ganadero. Central de Divulgación Técnica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Estación Experimental Quilamapu. 127p.

Sotomayor, E. 1954. Ensayo de abonos en arroz. 50 p. Memoria Ingeniero Agrónomo, Universidad Católica de Chile., Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Theune, H. 1941. Estudio taxonómico de nuestra ´semilla nacional´ de arroz. 109 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile., Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Torrealba, S. 1956. El problema del arroz en Chile. 111 p. Memoria de Ingeniero Comercial. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Villalobos, E. 1941. El cultivo del arroz y su importancia económica. 81 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Whan A., Smith, A., Cavanagh, C., et al. 2014. GrainScan: a low cost, fast method for grain size and colour measurements. Plant Methods 10: 23.

Gentileza empresas Tucapel S.A.

Gentileza empresas Carozzi S.A.

SECCIÓN V. PRODUCCIÓN, COMERCIALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE SEMILLA

Capítulo 11. Producción y comercialización mundial del arroz

Patricio Méndez del V.

El arroz es la base de la alimentación de la mitad de la población mundial y el segundo cereal más producido en el planeta después del maíz y el trigo (Cuadro 1). Sin embargo, es el primero en términos de consumo humano ya que casi la totalidad del arroz producido se destina al consumo directo, mientras que gran parte del maíz es utilizado en la alimentación animal y biocombustibles, entre otros. Otra característica del arroz es su fuerte concentración en las regiones asiáticas, donde se produce y se consume casi el 90 % de este cereal en el mundo. De los 756 millones de toneladas (Mt) de arroz con cáscara producidas (501 Mt base arroz pulido) en 2019, aproximadamente 680 Mt (451 Mt de arroz pulido) fueron cosechadas en Asia (Cuadro 2).

Cuadro 1. Producción, comercio y consumo mundial de cereales en millones de toneladas (Mt) y porcentaje (%) en 2019.

Cereal	Producción	%	Área	%	Rendimiento	Comercio	%	Consumo	%
Maíz	1.112	38	194	27	5,732	170	37	1.120	42
Arroz*	756	26	163	23	4,638	44	10	505	19
Trigo	762	26	215	30	3.544	188	41	740	28
Otros cereales	310	11	142	20	2.183	55	12	325	12
Total	**2.940**	**100**	**714**	**100**	**4.118**	**457**	**100**	**2.690**	**100**

Fuentes: FAO (2020) y USDA FAS (2020).
*Producción arroz cáscara, comercio y consumo arroz pulido (arroz cáscara x 0,67).

Principales países productores

China, India e Indonesia son los tres principales productores de arroz en el mundo, representando un 60 % de la producción total. Otra de las particularidades del arroz es que una pequeña proporción (9 %) de la producción se destina al comercio internacional, mientras que el comercio del trigo y maíz representa el 22 % y el 14 % de la producción, respectivamente. Esto significa que los principales productores de arroz son también los principales consumidores.

Cuadro 2. Producción, comercio y consumo de arroz blanco por región, en millones de toneladas (Mt) y porcentaje (%) en la temporada 2018/19.

Regiones	Producción (Mt)	%	Importaciones	%	Exportaciones	%	Consumo	%
Asia *	451	89	12,8	29	36,0	82	427	85
China	145	29	3,8	9	2,8	6	147	29
India	116	23	0,1	0	9,8	22	103	20
Indonesia	47	9	0,4	1	0	0	38	8
Américas	26	5	5,7	13	6,7	15	24	5
Latinoamérica	19	4	4,2	10	3,6	8	19	4
Sudamérica	17	3	1,8	4	3,5	8	15	3
Centroamérica & Caribe	2	0	2,4	5	0,1	0	4	1
Norteamérica	7	1	1,5	3	3,1	7	5	1
África Subsahariana	18	4	16,0	36	0,4	1	34	7
Oriente Medio**	7	1	6,1	14	0,5	1	12	2
Europa & Oceanía	3	1	3,5	8	0,5	1	5	1
Mundo	**506**	**100**	**44,1**	**100**	**44,1**	**100**	**503**	**100**

Fuente: FAO (2020).
*Excluye Oriente Medio.
**Incluye África del Norte.

La satisfacción de la demanda mundial de arroz depende principalmente de los volúmenes producidos en el continente asiático. No obstante, las perspectivas para los próximos decenios no son fáciles de estimar (Jeanguyot y Ahmadi, 2002). Asia ha conseguido alcanzar su autosuficiencia gracias a la Revolución Verde iniciada a mediados de los años 60. Entre 1965 y 1985, la producción asiática tuvo un fuerte crecimiento de 2,9 % al año, gracias a los rendimientos anuales que aumentaron a un ritmo de 2,4 %. América Latina, inspirándose del modelo asiático, también mejoró sus rendimientos y su producción a partir de los años 80 a un ritmo de más de 3 % por año (Cuadro 3). En cambio, desde finales de los años 1990 los rendimientos mundiales han aumentado sólo a razón de un 1 % al año. En Latinoamérica y U.S.A. también se observa una mitigación, pero manteniendo aún una tasa de progresión superior al promedio mundial. En África Subsahariana, donde la Revolución Verde no se realizó como en otras regiones del mundo, los rendimientos tuvieron un casi estancamiento durante los años 80 hasta el 2000 (Méndez del Villar, 2009). Actualmente, los rendimientos africanos progresan a un ritmo de 1,2 % al año, pero siguen siendo los más bajos en el mundo y en promedio no sobrepasan las 2 t ha^{-1}.

Cuadro 3. Evolución de los rendimientos (kg ha^{-1}) por regiones 1965-2018.

Regiones	Rendimiento 1965-1985	Tasa Anual %	Rendimiento 1985-2000	Tasa Anual %	Rendimiento 2000-2018	Tasa Anual %	Rendimiento 1965-2018	Tasa Anual %
Asia *	2.592	2,4	3.659	1,2	4.317	1,1	3.477	1,6
China	3.822	3,0	5.823	1,1	6.541	0,6	5.300	1,6
India	1.770	2,3	2.657	2,0	3.354	1,4	2.560	1,9
Indonesia	2.783	4,1	4.255	0,7	4.867	1,0	3.901	2,1
Américas	2.294	1,5	3.396	2,9	5.116	1,9	3.568	2,0
Latinoamérica	1.894	1,6	2.872	3,1	4.535	2,2	3.071	2,2
Sudamérica	1.823	1,4	2.829	3,5	4.668	2,4	3.080	2,3
Centroamérica & Caribe	2.547	2,9	3.289	0,3	3.607	0,6	3.110	1,4
Norteamérica	5.136	1,2	6.431	1,0	7.911	1,0	6.444	1,1
África Subsahariana	1.441	1,0	1.651	0,2	1.892	1,2	1.654	0,8
Oriente Medio**	4.170	0,9	5.302	2,1	6.735	0,3	5.363	1,0
Europa & Oceanía	4.154	0,9	5.129	2,0	6.302	0,3	5.161	1,0
Mundo	**2.561**	**2,3**	**3.584**	**1,3**	**4.229**	**1,0**	**3.414**	**1,5**

Fuente: FAO (2020).
*Excluye Oriente Medio.
**Incluye África del Norte.

Actualmente, las disponibilidades mundiales (producción e inventarios) son suficientes para responder a la demanda global. Asia no sólo produce para sus necesidades domésticas, sino que también dispone de grandes excedentes exportables. Más de 80 % de las exportaciones mundiales son originarias del continente asiático (Cuadro 2). India, Tailandia, Vietnam y Pakistán son los líderes del mercado internacional desde hace más de 30 años, y junto a los U.S.A., concentran más del 80 % de las exportaciones mundiales (Figura 1a). El resto de las exportaciones se reparten de manera marginal entre un pequeño número de países, dentro los cuales están Argentina, Birmania, Brasil, Camboya, Egipto y Uruguay. Las importaciones son más difusas en el mundo, con cuatro grandes polos dominantes: África Subsahariana, Extremo Oriente, Oriente Medio y Sudeste asiático (Figura 1b). Otras dos regiones importadoras de menor importancia son América Latina y Europa occidental.

Figura 1a. Repartición geográfica de las exportaciones mundiales de arroz.

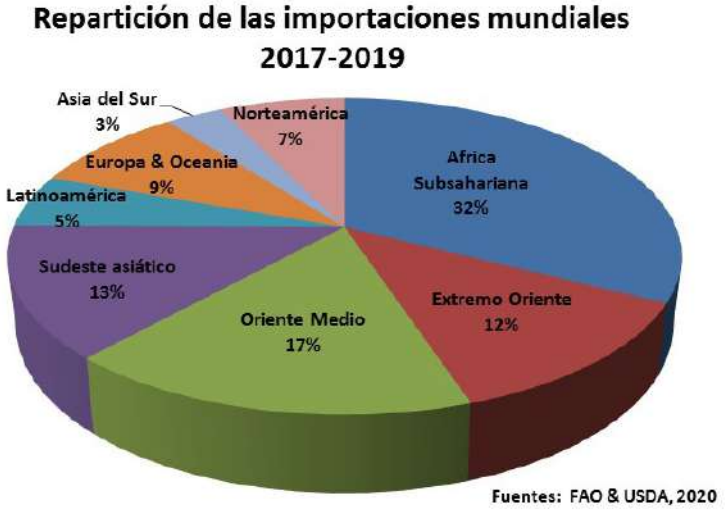


Figura 1b. Repartición geográfica de las importaciones mundiales de arroz.

Otra característica del mercado del arroz es la fuerte segmentación geográfica en los intercambios comerciales. Más del 90 % de las importaciones asiáticas son originarias de la misma región y más del 60 % de las exportaciones estadounidenses van a países de Latinoamérica y el Caribe. Dentro de esta segmentación, África Subsahariana es una excepción, por ser una región altamente deficitaria. Casi la mitad del arroz consumido en esta región es importado, principalmente desde Asia. En cuanto al Mercosur, considerada como zona excedentaria de arroz, también destinaba sus excedentes, hasta un período reciente, a su mercado regional, principalmente Brasil. Pero con el advenimiento de este último como exportador neto, a partir de 2010, los exportadores del Mercosur han tenido que buscar nuevos mercados, como en Centroamérica y el Caribe, África Occidental y Oriente Medio.

Transformaciones del mercado mundial de arroz

El comercio mundial del arroz ha pasado por grandes transformaciones desde inicios de los años 90. Los volúmenes se han multiplicado en casi cinco veces, pasando de 10 Mt a 48 Mt en 2018 (Figura 2). A finales de los años 1980, el comercio mundial representaba menos de 4 % de la producción en el mundo, incrementándose en los últimos 20 años hasta alcanzar actualmente entorno al 9 %. Algunos de los principales motores de la demanda mundial fueron los países de África Subsahariana y del Oriente Medio. Más recientemente, China ha surgido como primer importador mundial y sus importaciones se han multiplicado por seis, desde 2012.

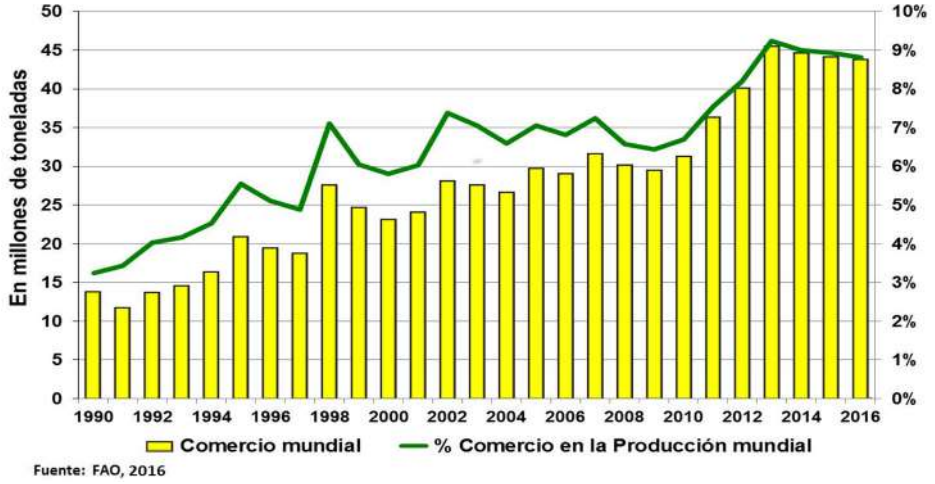
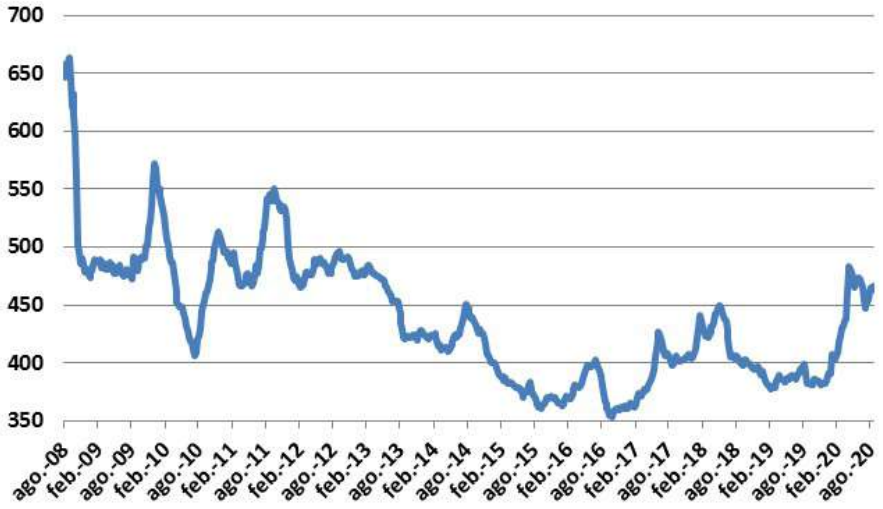


Figura 2. Comercio mundial de arroz y en porcentaje de la producción mundial.

Respuesta de los países deficitarios frente a la crisis del 2008

Durante los años 90 y hasta mediados de los años 2000, se pensaba que el mercado internacional iba en expansión, actuando como base de regulación de las necesidades mundiales y de estabilización de los precios internacionales, gracias a excedentes de exportación suficientes para responder a la demanda de importación. La crisis mundial del 2008 provocó una ruptura de este paradigma, llevando a los países deficitarios a revisar sus políticas públicas, tratando así de dinamizar la producción local y reducir la dependencia alimentaria frente a la volatilidad de los mercados externos (Lançon y Méndez del Villar, 2008). Diez años después de la crisis, los resultados muestran contrastes. Pocos países han alcanzado realmente a reducir estructuralmente las importaciones de arroz. En el mejor de los casos, se han estabilizado en parte gracias a un incremento de la producción local y/o un estancamiento del consumo interno. En el Sudeste Asiático y en Oriente Medio, las importaciones tienden efectivamente a estabilizarse. Mientras que en África Subsahariana la estabilización fue de corto período (Méndez del Villar y Lançon, 2014). Las importaciones se reactivaron nuevamente a partir de 2010, como resultado de una mayor oferta en los mercados internacionales y de precios relativamente bajos (Figura 3).



Fuente: OSIRIZ/InfoArroz (2020).
*Precio ponderado en función de precios de mercado de principales orígenes (Asia y Norteamérica).

Figura 3. Evolución de los precios internacionales, agosto 2008-agosto 2020 (US$/t FOB).

A pesar de una mayor oferta mundial, la crisis del 2008 modificó la postura de los países deficitarios. Parte de éstos han definido objetivos de autosuficiencia a mediano plazo, basándose en las potencialidades existentes y adoptando políticas públicas en favor del sector productivo local.

Dinámicas productivas en América Latina

América Latina, a pesar de representar sólo el 4 % de la producción mundial, es la segunda región productora fuera del continente asiático, y cuenta con un fuerte potencial de áreas disponibles en el futuro (Méndez del Villar, 2010).

La Cuenca de la Plata es la primera región productora de arroz del continente con 13 Mt (Figura 4), representando más de 50 % de la producción de América Latina, y 1,7 millones de hectáreas (Mha) localizadas, principalmente, en zonas templadas y subtropicales. La región Andina, Centroamérica y el Caribe abarcan una superficie arrocera total de 2,2 Mha, representando 40 % de la producción y áreas arroceras latinoamericanas totales.

Brasil es el principal productor regional con 45 % de la producción latinoamericana y dispone de grandes reservas de tierras. El sector arrocero brasileño ha privilegiado la intensificación bajo riego en las regiones templadas al sur del país (Rio Grande do Sul y Santa Catarina) donde el cultivo representa un 85 % de la producción nacional (60 % de las áreas arroceras), contra un 50 % a inicios de los años 2000. Perú es el segundo productor latinoamericano con una producción anual de 3 Mt. Unas de las principales características del cultivo en Perú son los altos rendimientos, que sobrepasan en promedio 8 t ha^{-1}, gracias, entre otros, a la fertilidad de suelos de origen volcánico. Existen inclusive regiones norteñas como Áncash y La Libertad, así como la región de Arequipa al sur del país, donde los rendimientos promedio sobrepasan 12 t ha^{-1}. Colombia es el tercer productor regional con 2,5 Mt producidas anualmente. Las áreas arroceras se concentran principalmente en las regiones Central (42 %) y de los Llanos (38 %). Las áreas bajo riego alcanzan casi 60 % de las áreas totales de arroz, con rendimientos en torno a 5 t ha^{-1}, mientras que en sistemas de secano mecanizado (35 % de las áreas arroceras), los rendimientos no sobrepasan 4 t ha^{-1}. Argentina, Ecuador y Uruguay, completan la lista de

principales productores latinoamericanos de arroz con volúmenes de producción entre 1,2 y 1,5 Mt. En Argentina y Uruguay el arroz es exclusivamente cultivado bajo riego en las regiones norte y noreste de estos países, con rendimientos promedio de 8 t ha^{-1} y áreas totales entre 160 y 220.000 ha. En Ecuador, el cultivo de arroz se ha desarrollado, principalmente, en las regiones de Guayas (sistema bajo riego) y Los Ríos (predominancia de sistemas de secano). Los rendimientos, relativamente bajos, no sobrepasan 3,5 t ha^{-1} a nivel nacional dentro de un total de 350.000 ha. Inclusive, en sistemas bajo riego, los rendimientos alcanzan apenas 4 t ha^{-1}, debido a la falta de tecnologías proporcionadas a los productores.

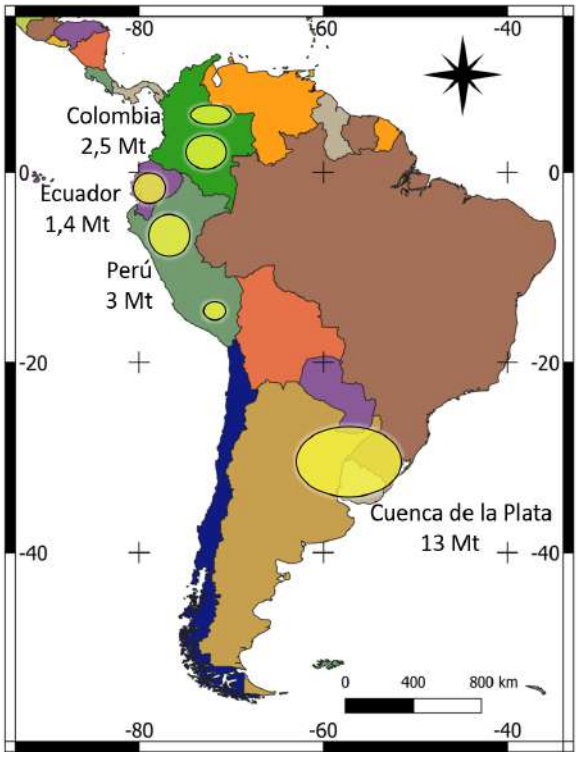


Figura 4. Principales regiones productoras de arroz en Latinoamérica.

Dinámicas productivas arroceras en el resto del mundo

En áreas orientales, sur y sudeste del continente asiático, la tecnología de la Revolución Verde fue ampliamente desarrollada, alcanzando así, globalmente su autosuficiencia y representando inclusive 80 % de las exportaciones mundiales. Sin embargo, esta región no tiene un margen importante de crecimiento de su producción, debido a la reducción de sus recursos hídricos y a la presión territorial (Trébuil y Hossain, 2004). Países como China, Indonesia y Filipinas, dentro de los principales productores mundiales que aún no han alcanzado a estabilizar el consumo de arroz, deben importarlo para satisfacer sus necesidades domésticas. Éstos se benefician también de condiciones favorables del mercado mundial (abundancia de disponibilidades exportables) para abastecerse a precios internacionales relativamente bajos. El caso de China es particularmente representativo, principal productor mundial, ya que su producción es equivalente a su consumo anual. Sin embargo, China es también, desde 2012, el primer importador mundial. A través de esta política de abastecimiento externo de 3 % de su consumo, China trata de incentivar su producción nacional gracias a precios más altos pagados a productor, en relación a los precios internacionales, e importa arroz a precios más bajos para estabilizar los precios en los mercados internos con inventarios relativamente altos; estos últimos casi se han duplicado entre 2006 y 2018.

Otras regiones arroceras en el mundo son África Subsahariana con 26 Mt (18 Mt arroz pulido), Oriente Medio y África del Norte con 11 Mt (7 Mt arroz pulido), U.S.A. con 10 Mt (7 Mt arroz pulido) y Europa y Oceanía con 3,5 Mt (3,2 Mt arroz pulido).

En África Subsahariana el arroz tiene históricamente una presencia antigua (Portères, 1976), pero su consumo y la producción se han desarrollado realmente a partir de los años 90. La producción se multiplicó casi por cuatro entre 1995 y 2018, pasando de 5 Mt de arroz pulido a 18 Mt. Durante este mismo período, el consumo de arroz se incrementó aún más, pasando de 10 Mt a mediados de los años 90 a más de 34 Mt en 2018. El déficit permanente del continente africano pasó, así, de 5 Mt a 16 Mt por año, teniendo que importar más del 40 % de su consumo anual, principalmente desde Asia.

Oriente Medio y África del Norte constituyen la cuarta región productora, alcanzando cerca de 11 Mt de arroz paddy, de las cuales Egipto produce más de 60 % y dispone de excedentes de exportación. Sin embargo, los excedentes egipcios se han ido reduciendo en los últimos 5 años, a causa de un estancamiento de la producción arrocera. Irán es el segundo productor regional con una producción de 2,6 Mt, pero sólo cubre el 60 % de su consumo doméstico; el 40 % restante es arroz importado de alta calidad. Históricamente sus principales abastecedores ha sido U.S.A. y Tailandia. Actualmente, Tailandia es aún el principal proveedor de Irán. Pero más recientemente, países como Argentina y Uruguay, buscando diversificar sus mercados externos, han comenzado a exportar con regularidad a este país.

En U.S.A. se producen cerca de 10 Mt al año, pero se consume sólo 60 % de la producción. Los excedentes van principalmente hacia Centroamérica y el Caribe. Las áreas arroceras, 100 % bajo riego, se concentran en los estados del sur (80 %) y en California (20 %), siendo Arkansas el principal estado arrocero con 50 % de las áreas cultivadas en el país. Los rendimientos nacionales superan 8,5 t ha^{-1} con máximos de 10 t ha^{-1} en California, donde se producen mayoritariamente arroces cortos y medianos de tipo *japonica*. Este último representa más de 90 % de la producción californiana de arroz, pero solamente 25 % de la producción nacional; el resto (75 %) es arroz de tipo grano largo.

En Europa y Oceanía la producción arrocera alcanza cerca de 5 Mt. Italia es el principal productor, con una producción media de 1,5 Mt. Rusia viene en segundo lugar con una producción de 1 Mt. Australia, que hasta inicios de los años 2000 podía ser considerada como principal productora y exportadora de este grupo de países, ha visto bajar dramáticamente su producción y su participación en el mercado de exportación, a causa de la sequía que afecta esta región de manera recurrente hace más de 20 años. Las áreas arroceras se redujeron a un tercio, situándose actualmente en torno a las 50.000 ha, pero mantienen rendimientos medios dentro de los más altos del mundo, sobrepasando 11 t ha^{-1}. En Europa occidental, la producción arrocera se concentra en la cuenca mediterránea. Además de Italia, ya citado, España (800.000 t), Grecia (225.000 t) y Portugal (170.000 t) completan la lista de los principales productores de la Unión Europea. Al este del continente, Ucrania se presentaba como productor promisorio con una producción de 150.000 t, hasta que los efectos de la guerra civil, a partir de 2014, provocaron una fuerte caída de la producción, la que se redujo sólo a un tercio, entorno a las 60.000 t.

Avances tecnológicos realizados durante las décadas del 1960 al 2000

Durante los años 60, el cultivo del arroz realizó grandes logros, gracias a lo cual se le calificó de Revolución Verde, y cuyos fundamentos fueron el uso de nuevas variedades de menor tamaño (semi-enanas) y la utilización intensiva de insumos en sistemas de riego. Las extensiones a nuevas áreas arroceras fueron realizadas, principalmente en estos ecosistemas, en Asia y en el continente americano. En Asia, la superficie arrocera pasó de 115 Mha en los años 1960-1970, a 135 Mha en los años 2000, es decir un crecimiento anual de 0,4 %, tendencia que aún se mantiene. Por otra parte, la producción se triplicó durante los últimos 60 años, creciendo a un ritmo de 1,6 % al año, gracias a un incremento significativo de los rendimientos (Cuadro 3). La producción mundial de

arroz con cáscara pasó de 200 Mt a inicios de los años 1960, a 756 Mt en 2019. El crecimiento de la producción se observó principalmente durante los años 1970 y 1980, con una tasa anual de 2,5 %. En cambio, desde los años 2000 la producción progresa en un promedio de sólo 1,5 % por año, debido a rendimientos que crecen a un ritmo anual del 1 %, contra el 2,3 % de los años 1965-1985 (Cuadro 3).

Progresos tecnológicos en Latinoamérica

Los progresos tecnológicos no sólo han ocurrido en los países asiáticos. El arroz ha tenido también un buen crecimiento en América Latina, donde la producción casi se duplicó, creciendo a razón de 2,7 % al año por mejores rendimientos, lo que permitió pasar de 15 Mt a inicios de los años 1980, a 28 Mt en 2018. Gran parte de estos logros se debió a una mayor proporción del arroz de riego, de casi 50 % de las áreas totales de arroz del continente, contra 35 % a finales de los años 1980. Las extensiones de áreas arroceras, combinadas a un mejor control hídrico, mayor uso de insumos y de variedades modernas más productivas, han completado los avances del arroz en el continente.

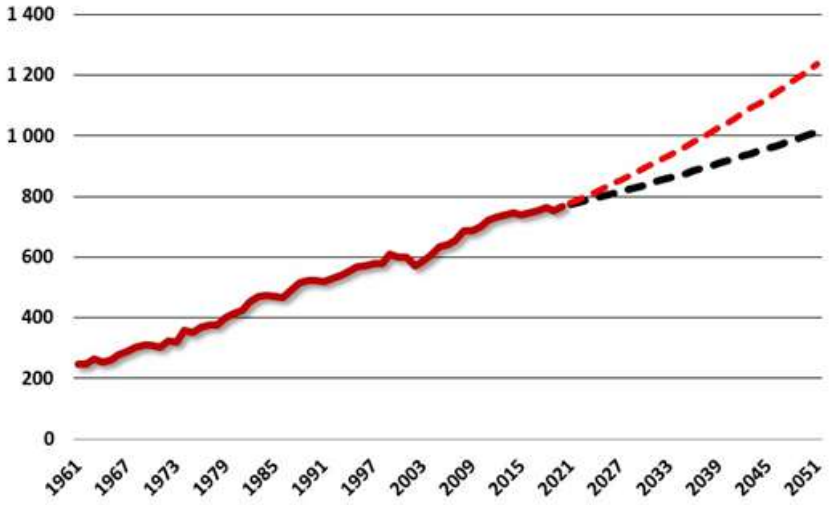
Representando un total de 5,5 Mha a medianos de los años 1960, las áreas de arroz pasaron a 7 Mha a inicios de los años 1990, destacando principalmente en las regiones tropicales y subtropicales, donde las condiciones climáticas son más propicias al cultivo. Actualmente, las áreas arroceras en Latinoamérica se sitúan en torno de 5 Mha. Esta contracción, en relación a los años 90, se debe a la reducción de las áreas de arroz de secano en Brasil.

Tendencias futuras de la producción y de la demanda mundial de arroz

La producción mundial ha podido responder a la demanda mundial, gracias a una relativa estabilización del consumo planetario a partir de los años 2000. La población mundial crece a una tasa menor y los países asiáticos emergentes, con altos niveles de consumo de arroz, ya han empezado sus transiciones alimentarias hacia modelos de consumo más diversificados de tipo occidental, donde el consumo per cápita de arroz es más bajo. Sin embargo, en la mayoría de los países menos avanzados de Asia y de África Subsahariana, el consumo total y per cápita de arroz aún continúa en aumento por razones demográficas y de fuerte urbanización. Por lo tanto, si la demanda y oferta mundial se encuentran en una situación de relativo equilibrio, existen regiones, dentro de las más pobres del mundo, donde el déficit arrocero tiende a agravarse y la inseguridad alimentaria es crónica.

La mitigación en los avances tecnológicos observada durante las dos últimas décadas, pone en perspectiva el problema de la evolución de la producción de arroz y cómo atender la demanda mundial futura que continuará aumentando con el crecimiento demográfico. Según nuestras estimaciones (Méndez del Villar, 2009), la producción mundial de arroz debería crecer de 100 Mt al horizonte del 2030, para alcanzar unas 850 Mt producidas anualmente, y de 150 Mt más hacia el 2050, pudiendo así alcanzar cerca de 1.000 Mt de arroz cáscara (650 Mt arroz blanco) y atender una población de más de 9 billones de habitantes (Figura 5). Cabe resaltar que estas estimaciones consideran un consumo per cápita constante y no toman en cuenta las transiciones alimentarias que se observan en los países menos avanzados con mayor crecimiento demográfico y donde el consumo de arroz per cápita seguirá aumentado, por lo menos durante los próximos 25 años. Otro escenario sería considerar un crecimiento del consumo per cápita, necesitando unas 200 Mt suplementarias, para alcanzar 1.200 Mt de arroz cáscara, lo que exigiría nuevos cambios tecnológicos e incentivos para desarrollar la cultura de arroz en regiones donde aún existen potencialidades en términos de recursos productivos (tierras, aguas para el riego, etc.). Variedades más productivas y tecnologías sostenibles serán también necesarias para responder a los grandes

desafíos de los próximos decenios, dentro de los cuales, la lucha contra la pobreza y la seguridad alimentaria forman los temas prioritarios.



Fuente: Estimaciones del autor.

Figura 5. Evolución de la producción mundial de arroz y tendencias futuras en millones de toneladas (Mt).

Estos desafíos para el futuro seguirán vigentes en los países donde el arroz constituye la principal fuente de alimentación y ocupa un importante papel social y económico en el sector agrícola. La cultura de arroz enfrenta también, y enfrentará aún más en el futuro, problemas climáticos recurrentes, principalmente los relacionados con el fenómeno *El Niño* (sequías en Asia y exceso de humedad al sur del continente americano), además de los cambios climáticos que podrán afectar las condiciones de vida de los habitantes en zonas rurales. La demografía galopante, la fuerte urbanización y las transiciones alimentarias en países en desarrollo, continuarán siendo parámetros importantes en la evolución de la demanda mundial, siendo éstos, unos de los grandes desafíos a los cuales serán enfrentados la investigación mundial y el sector arrocero en su globalidad.

Sistemas de producción de arroz

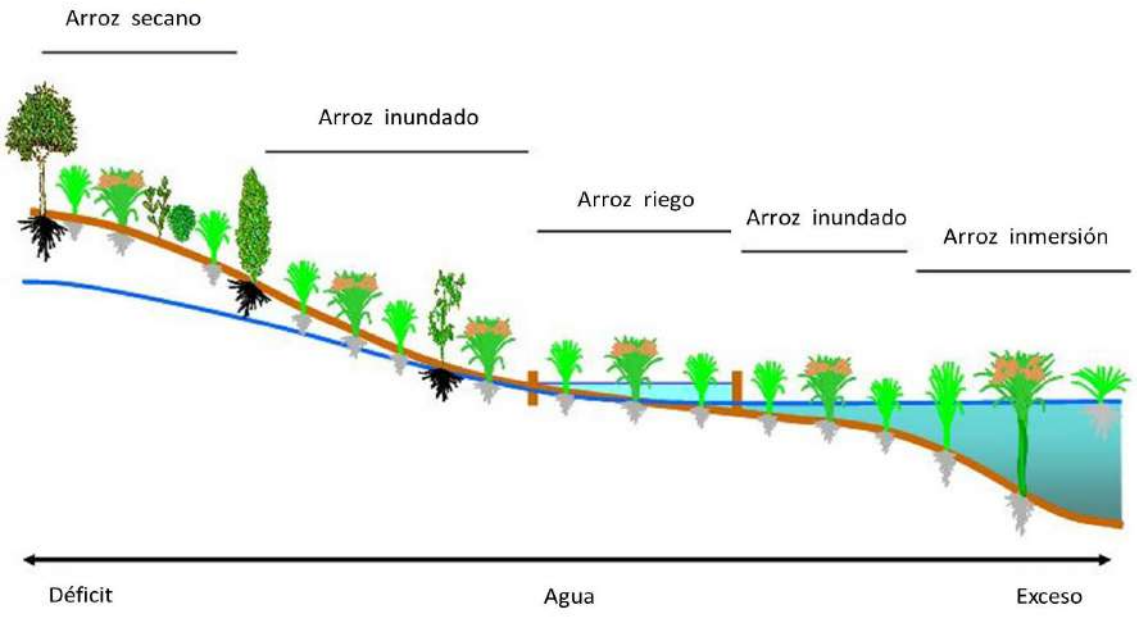
El arroz es cultivado bajo diversas condiciones climáticas en los cinco continentes y en diferentes latitudes. Existen también diversos sistemas de cultivo (Figura 6), siendo el sistema bajo riego el más representativo en el mundo, con cerca de 60 % de las áreas plantadas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Ecosistemas productivos del arroz en el mundo (%).

Ecosistemas	Riego	Inundado	Secano	Inmersión profunda
Asia	58	32	7	3
América Latina	48	5	47	-
África	23	35	33	9
Europa y Oceanía	100	-	-	-
Mundo	56	33	8	3

Fuente: IRRI (2008).

En otros ecosistemas, el arroz es cultivado sin control de las aguas de regadío (arroz inundado), las cuales pueden ser pocas o muy profundas según las regiones de cultivo.



Fuente: Trébuil y Hossain (2004).

Figura 6. Principales ecosistemas arroceros en el mundo.

Los dos casos, la falta de agua o el exceso por causa de inundaciones, pueden ser devastadores en la producción de granos. El arroz de secano, o de temporal, es el sistema de cultivo que se maneja como en el cultivo del trigo, sin inundación de las parcelas en ningún momento del ciclo cultural y en suelos bien drenados. Este tipo de sistema, bien representado en América Latina, es consumidor bastante significativo de insumos, especialmente en los Cerrados brasileños y Llanos colombianos, donde los rendimientos pueden sobrepasar con frecuencia las 5 t ha^{-1}. En cambio, en África Subsahariana, donde el arroz de secano representa un tercio de las áreas arroceras, se trata frecuentemente de sistemas de auto-subsistencia con baja tecnología, y con rendimientos, por lo general, inferiores a 1 t ha^{-1}.

Referencias

FAO. 2020. Food outlook, 1995-2020. FAO, Rome, Italy. http://www.fao.org/WAICENT/faoinfo/economic/giews/english/fo/index.htm.

Jeanguyot, M., Ahmadi, N. 2002. Grain de riz, grain de vie. 137 p. Magellan & Cie, Paris, France.

Lançon, F., Méndez del Villar, P. 2008. La flambée des prix mondiaux du riz: crise conjoncturelle ou mutation durable? Hérodote 131:156-176.

Méndez del Villar, P. 2009. Investigación, desarrollo e innovación en arroz. En Simposio Internacional FAO, Cadena de valor: Situación actual y perspectivas para semillas oleaginosas, aceites y grasas, cereales y arroz, Santiago de Chile. 6 de noviembre 2009. Ministerio de Agricultura, FIA, Odepa, FAO, Santiago, Chile.

Méndez del Villar, P. 2010. Producción y mercados arroceros en Latinoamérica y Caribe. XI

Conferencia Internacional de Arroz para América Latina y el Caribe, Cali, Colombia. 21-24 de septiembre 2010. Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Federación de Arroceros de Colombia (FEDEARROZ) y Centro Internacional de Investigación del Arroz (IRRI), Cali, Colombia.

Méndez del Villar, P., Lançon, F. 2014. West African rice development: Beyond protectionism versus liberalization? Glob. Food Sec. 5:56-61.

OSIRIZ/InfoArroz. 2020. Precios internacionales. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), París, Francia.

Portères, R. 1976. African cereals: Eleusine, fonio, black fonio, teff, Bracharia, Paspalum, Pennisetum and African rice. p. 409-463. In Harlan, J.R., de Wet, J.M.J., Stemler, A.B.L. (eds.) Origins of African plant domestication. Cambridge University Press, New York, USA.

Trébuil, G., Hossain, M. 2004. Le riz. Enjeux écologiques et économiques. 231 p. Bélin, Paris, France.

USDA FAS. 2020. Production, supply and distribution database (Online). https://data.nal.usda.gov/dataset/production-supply-and-distribution-database. USDA, Foreign Agricultural Service (FAS), Washington, DC, USA.

Capítulo 12. Historia de la producción de arroz en Chile. 1920-2020

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ.

I. Producción de arroz. 1920-1940.

Primeros antecedentes

Los primeros antecedentes sobre el interés de producir arroz en Chile se remontan a la época en que Don Ambrosio O´Higgins, era Gobernador del Reino de Chile (1788 – 1796). Bajo esa distinción realizó un viaje por algunas ciudades de Chile para fomentar la producción agrícola y minera del país. Es así como en Huasco y La Serena recomendó realizar el cultivo de la caña de azúcar y el algodón, y en las ciudades de Aconcagua, Quillota y Coquimbo propuso cultivar arroz (Dinator, 2015).

A mediados de 1800, ya se observaba gran interés de los hacendados por empezar a producir arroz debido al ´gran consumo` de este producto por la población chilena. En aquella época, la importación de arroz en el país era de aproximadamente 2.450 toneladas (t) (Gay, 1846). El gobierno, consciente de este interés y necesidad de ahorrar divisas, el 12 de agosto de 1850 estableció mediante un Decreto la protección del cultivo del arroz y lo eximió del derecho al pago del diezmo a la cosecha. Sin embargo, y a pesar de esta situación la producción de arroz en el país aparecía como poco rentable y atractiva, debido a los bajos precios internacionales. Unida a esta situación, estaba la preocupación sanitaria de las autoridades del país que señalaban que en el caso de producir arroz se debían: a) tomar las precauciones necesarias para cuidar la salud de la población trabajadora, debido a la posibilidad de ´contraer enfermedades y fiebres` que se pensaba estaban asociadas al cultivo del arroz; b) mantener una constante vigilancia sanitaria sobre esta situación y; c) evitar mantener el agua estancada en los cuadros sembrados, especialmente en los primeros estados de desarrollo de la planta, para prevenir una alta población de mosquitos, los que se convertirían en posibles focos de transmisión de enfermedades (Gay, 1846).

A pesar del interés del gobierno y los agricultores por la introducción del cultivo del arroz en el país, pasó bastante tiempo hasta que este anhelo se hizo realidad. En aquella época se debatían dos posibilidades. La primera sostenía que era posible establecer el cultivo de arroz en condiciones de secano, principalmente en las provincias meridionales de Chile, donde el suelo era húmedo y las lluvias frecuentes, o desarrollar el cultivo bajo condiciones de riego, en aquellos suelos que tuvieran abundante agua (Tornero, 1872). Por otro lado, se planteaba también, que no era posible cultivar arroz en Chile, ya que el país no contaba con el agua suficiente para el desarrollo del cultivo, ni tampoco poseía las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento de la planta. Además, se agregaba que, aunque el país poseyera el agua suficiente, el cultivo del arroz no sería una buena alternativa productiva y económica, ya que, con la cantidad de agua requerida para producir una hectárea de arroz, se podría producir cuatro a cinco hectáreas de otros cultivos (Opazo, 1922).

Primeras experiencias del cultivo de arroz en el país

En relación a los factores que estimularon la introducción y experimentación de nuevos cultivos, entre ellos el arroz, se mencionan el efecto negativo de la gran depresión y las consecuencias de las guerras internacionales a finales de la década de 1920 y principios de la década de 1930,

que provocaron problemas en el abastecimiento de algunos productos al país. Entre los cultivos introducidos y que posteriormente fueron sembrados comercialmente en el país, estaban el arroz (*Oryza sativa* L.), girasol o maravilla (*Helianthus annus* L.) y la remolacha o betarraga sacarina (*Beta vulgaris* L.). Este trabajo de introducción de nuevas alternativas productivas estuvo fuertemente estimulado y apoyado por la Junta de Exportaciones Agrícolas, organismo estatal creado para este objetivo (Villalobos et al., 2001).

Varias décadas después, los agricultores decidieron empezar a experimentar con la posibilidad de sembrar arroz en el país. Los antecedentes disponibles permiten señalar que las primeras siembras de arroz se realizaron alrededor de 1920 (Anríquez, 1934; Villalobos, 1941; Astorga, 1944; Garcés, 1945; Olate, 1950; Uribe, 1955; Torrealba, 1956; Koller, 1958; González, 2018), aunque las primeras cifras oficiales de producción de arroz del país se remontan a la temporada 1932-1933. A pesar de ello, el Segundo Censo Agropecuario (1935-1936) no incluyó información oficial sobre la producción de arroz en el país (Dirección General de Estadísticas, 1931; 1933; 1938). Por otro lado, antecedentes señalan que en el año 1918 se habría realizado una de las primeras siembras de arroz en el país, específicamente en la provincia de Linares (Foto 1). Esta siembra la habría realizado el Sr. Joaquín Mestre, en el Fundo Alta Gracia, ubicada en el camino a La Montaña, frente al criadero de caballos del Almendro. Esta siembra se habría realizado en una vega que se rellenó con suelo extraído de los caminos rurales y con semilla importada desde Valencia, España, utilizando el sistema de almácigo y trasplante. El éxito de esta siembra y la habilitación del canal Melao habrían incentivado a otros agricultores a sembrar arroz (González, 2018).

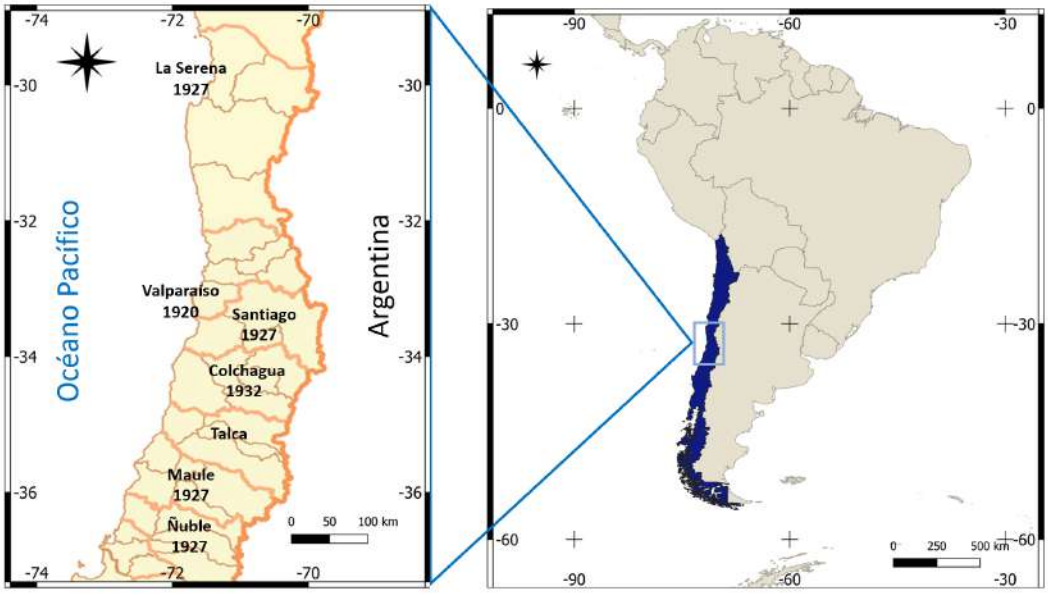


Figura 1. Primeras siembras de arroz en Chile. Gobierno de Chile, 1928.

Otra información señala que, en el año 1923, un ciudadano japonés, el Sr. Hata, habría realizado también una de las primeras siembras de arroz en el país, en el Fundo Yaquil de propiedad del Sr. Álvaro Bunster, ubicado en los Altos de Valparaíso. La semilla utilizada en esta siembra habría sido importada desde Perú. En este caso, se menciona que debido a la ´mala adaptación de las plantas, los bajos rendimientos y la calidad deficiente del grano de arroz cosechado` no se habría continuado con este experimento (Gil, 2012; Olate, 1950).

Una nueva información relata que, en el año 1927, se habría sembrado arroz por primera vez en las ciudades de Quillota y Casablanca, pero con ´muy malos resultados`. En la misma época se habría sembrado arroz también en La Serena con un ´buen resultado` (producción). Dado lo anterior, una muestra del arroz producido en La Serena se expuso en una vitrina de una joyería de Santiago, como una manera de promocionar la siembra de arroz en el país. Sin embargo, la repetición de esta experiencia en La Serena no tuvo los resultados obtenidos con anterioridad y la cosecha se perdió completamente.

Alrededor de la misma época, también se sembró arroz en las ciudades de Renca, Talca y Linares, con resultados positivos y negativos. Sin embargo, en una pequeña siembra realizada en el jardín por una religiosa del Hospital de la ciudad de San Carlos, se habría obtenido un ´buen resultado`, es decir, se habría cosechado arroz (Olate, 1950). Aparte de estas experiencias, varios extranjeros con algunos conocimientos sobre el cultivo del arroz desarrollaron otros proyectos destinados a establecer este cultivo en diferentes zonas del país, con resultados positivos y también negativos (Anríquez, 1934).

Los primeros intentos de la producción del arroz en el país, se realizaron sin un mayor conocimiento de la planta y del sistema de cultivo, utilizando el método de la ´prueba y error`. Es así como los agricultores concentraron sus esfuerzos en la introducción de una gran cantidad de variedades, las que fueron sembradas en diferentes localidades del país, con la esperanza de obtener alguna producción. Durante las primeras introducciones, no hubo ninguna preocupación por el origen de las variedades, muchas de las cuales provenían de regiones tropicales y subtropicales, las que, al ser sembradas en condiciones de clima templado, no daban buenos resultados. Estas variedades presentaban un largo período vegetativo y en varias ocasiones no alcanzaban a producir grano o a madurar. Debido a esta situación, el obtener una variedad (´semilla`) que tuviera una buena adaptación a las condiciones, principalmente climáticas del país, pasó a constituirse en la primera prioridad de esa época. Alrededor de 1928, la Estación Agronómica del Ministerio de Agricultura inició el ´primer trabajo de mejoramiento genético`, que consistió en la colección de granos (´semilla`) de arroz proveniente de siembras de agricultores que habían obtenido buenos rendimientos. Esta semilla fue distribuida entre los agricultores interesados en sembrar arroz, como una manera de empezar a mejorar, estabilizar la producción y la calidad del arroz producido en el país (Garcés, 1945; Uribe, 1955; Koller, 1958).

Los constantes fracasos en las siembras obligaron a los agricultores a cambiar su estrategia de introducir variedades desde ´cualquier país` y a priorizar la importación de variedades desde países con características climáticas similares (latitud) a las del país. Este cambio de estrategia dio buenos resultados y las nuevas variedades importadas presentaron una mejor adaptación a las condiciones agroecológicas de nuestro país. Sin embargo, estas variedades poseían una alta susceptibilidad al desgrane, lo que obligaba a cambiarlas constantemente (Astorga, 1944). Debido a esta situación, no era posible mantener la pureza de las variedades introducidas. Es así como al poco tiempo de ser cultivadas, se perdía la identidad de las variedades, produciéndose una mezcla entre ellas. Esto derivó a tener un grupo de variedades que estaban constituidas por una mezcla de materiales introducidos y adaptados a las condiciones climáticas del país. Esta mezcla inicial de variedades contribuyó a la formación de lo que más tarde se llamaría 'semilla nacional' que, por varios años, fue la base de la producción de arroz del país (Astorga, 1944).

A pesar de todos estos inconvenientes, el interés por producir arroz en el país continuó en la próxima década. Así, a principios de la década de 1930, se observaban pequeñas superficies de ´siembras experimentales` de arroz de carácter comercial y algunas siembras de mayor superficie que utilizaban las diferentes variedades introducidas. A pesar de los avances logrados en la década anterior, los resultados de estas experiencias, en algunos casos fueron satisfactorios, pero en la mayoría de ellos fueron negativos.

Durante el año 1932 se realizaron 15 ´siembras experimentales` de arroz en campo de agricultores, con variedades de origen italiano que habían dado un mejor resultado en siembras anteriores. Estas siembras experimentales ocuparon una superficie aproximada de 85 ha, algunas de las cuales se mencionan en el (Cuadro 1). En estas ´siembras experimentales`, las dos variedades que presentaron el mejor resultado fueron: ´Zanzio`, por su mayor precocidad, y la variedad ´Italiana` introducida desde Argentina, de grano grande, pero un poco más tardía que ´Zanzio`. Éstas y otras variedades permitieron formar un nuevo ´grupo de variedades` que se caracterizaron por su mayor precocidad y mayor rendimiento bajo nuestras condiciones de clima templado. Sin embargo, rápidamente se mezclaron (´degeneraron`) con otras variedades, lo que obligó a cambiarlas para mantener los rendimientos (Opazo, 1939).

Los resultados de estas experiencias indicaron que sólo las siembras realizadas en las localidades de Renca, Los Loros y Polonia, ubicadas en la zona central del país, tuvieron un buen resultado. Dentro de ellas se destacó la siembra realizada en el Fundo Quilapán, ubicado en la localidad de Polonia, por su mayor superficie (Cuadro 1). Por ello, se describe el sistema de producción utilizado en este fundo, para dar a conocer la tecnología utilizada en aquella época (Anríquez, 1934).

Cuadro 1. Agricultor, lugar y superficie (ha) de siembras de arroz realizadas en Chile en 1932.

Agricultor	Lugar	Superficie (ha)	Resultado
Julio Araya	Santiago (Estación Agronómica)	1/5	Negativo
Julio Araya y Aníbal Barrios	Lonquén	7,9	Positivo, cosecha 3 t
Hermanos González	La Serena	15,7	Negativo
Vicente Villagra	Renca	1	Positivo, cosecha 5,4 t
Jenaro Prieto	Llay Llay (Santa Teresa)	0,8	Negativo
Jenaro Prieto	Los Loros	0,8	Positivo
Jenaro Prieto	Los Andes	1/5	Negativo
José Leguía	Talagante (Caja de Compensación)	1,5	Negativo
Técnico español	Linares	15,7	Negativo
Angel Bozzano	San Bernardo, Santiago (Politécnico de Menores)	1/3	Negativo
Bernardo Moreno	Polonia, San Fernando (Fundo Quilapán)	36,2	Positivo, cosecha 1,1 t ha^{-1}

Fuente: Anríquez, 1934; Astorga, 1944.

La siembra del arroz se estableció en un suelo con alto contenido de arcilla, poco profundo y muy desnivelado, lo que obligó a realizar cuadros muy angostos, con un fuerte incremento en los costos de producción. La semilla de arroz sembrada fue del tipo Moscado, variedad ´Carolino`, traída desde la localidad Quilmes, Argentina. El sistema de siembra fue de almácigo y trasplante. La siembra del almácigo se realizó el 26 de octubre, muy tarde debido al retraso de la llegada de la semilla. El trasplante se realizó entre el 20 de noviembre y el 13 de diciembre. La cantidad de semilla utilizada fue alrededor de 34,5 kg ha^{-1}. La cosecha se realizó en forma manual, segando las plantas de arroz a mano, desde fines de abril hasta el 10 de mayo. Para la trilla se utilizó una trilladora ´Case`, a la que se le sacó diente por medio a los cóncavos para facilitar su labor. La velocidad del cóncavo fue de 600 rpm. El rendimiento fue de 1,1 t ha^{-1} (Anríquez, 1934).

Las causas del bajo rendimiento se atribuyeron: a) uso inadecuado de semilla, importación de semilla de una zona cálida que tuvo una mala adaptación; b) siembra-trasplante tardía; c) baja temperatura del agua, lo que causó la pérdida de plantas de arroz a la entrada de todos los cuadros, hasta que el agua alcanzó una temperatura de 12° C, aproximadamente; d) alta esterilidad floral debido a las bajas temperaturas en la etapa reproductiva; y e) el largo del período vegetativo de la ´variedad` utilizada (Anríquez, 1934).

Éstos y otros experimentos permitieron demostrar que era posible producir arroz en forma extensiva y comercial en Chile, como también dar las primeras recomendaciones técnicas para su cultivo (Opazo, 1939; Uribe, 1955; Koller, 1958). Los resultados de estas experiencias permitieron concluir también que se podía establecer el arroz en las localidades situadas al poniente del valle central, es decir, en localidades más cercanas a la cordillera de la costa, en algunas localidades de los valles transversales, donde las condiciones climáticas eran más benignas para el desarrollo de la planta, y en algunos suelos considerados ´marginales` para otros cultivos. Estos suelos, por lo general, estaban ubicados en terrenos bajos, eran arcillosos y, en algunos casos, poseían un subsuelo impermeable que solía inundarse en invierno (Astorga, 1944).

Basado en estos resultados, se determinó que la zona comprendida entre Santiago y Ñuble poseía los terrenos y condiciones climáticas adecuadas para el cultivo del arroz y, dentro de esta zona, las provincias que poseían alto porcentaje de ´suelos arroceros` eran Talca, Linares y Ñuble (Koller, 1958). A pesar de los buenos resultados obtenidos en los suelos arcillosos, se recomendaba evaluar económicamente la factibilidad de sembrar arroz en suelos de mejor calidad (Opazo, 1939; Astorga, 1944).

En el año 1933, continuaron las ´siembras experimentales` y la superficie sembrada con arroz aumentó a 144 ha, nuevamente con algunos éxitos y también fracasos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Agricultor, lugar de siembra, superficie sembrada (ha) y resultado de las siembras de Arroz en 1933.

Agricultor	Lugar	Superficie (ha)	Observaciones
Aníbal Barrios	Lonquén	31,5 ha	Se perdieron 10 ha, el resto tuvo un buen rendimiento
Eladio Rodríguez	Paine	28,3 ha	Negativo
Hermanos Ginestar y Jorge Larraín	Chépica	23,6 ha	Satisfactorio
Pedro Ugarte	Renca	11,0 ha	Negativo
Alejo Rubio	Graneros	9,4 ha	Satisfactorio
Bernardo Moreno	Polonia, Fundo Quilapán.	4,7 ha	Negativo
Vicente Villagra y Srs. Gelona	Graneros, Fundo el Arrozal	44,0 ha	Positivo, 4,5 t ha^{-1}
Pedro Tagle	Malleco	1/3 ha	Negativo
Sr. Yama, técnico japonés	La Cisterna, Santiago	1/4 ha secano	Negativo
Angel Bozzano	Ñuñoa, Santiago	200 m^2	Negativo

Fuente: Anríquez, 1934; Torrealba, 1956.

Los resultados obtenidos durante esta temporada indicaron que sólo la siembra realizada en el Fundo El Arrozal, ubicada en la localidad de Graneros, obtuvo un resultado positivo. Esta siembra se realizó en un buen suelo, donde las condiciones climáticas fueron adecuadas. Desde septiembre a marzo se acumularon 3.689 °C. En este campo se sembraron 10 ha al voleo (llamada siembra directa o de asiento) y en otras 18 ha se utilizó el sistema de almácigo y trasplante. La siembra se realizó desde el 20 de agosto hasta el 6 de noviembre. El principal problema fue las malezas. En esta siembra se detectaron 22 malezas diferentes, siendo la más abundante y perjudicial el hualcacho (*Echinochloa* spp.), por lo cual se realizaron de una a tres limpias manuales, dependiendo del grado de infestación de malezas, en los diferentes sectores sembrados. Se sembraron 30 ´variedades`, la mayoría de ellas obtenidas en el país. La cosecha se realizó desde el 5 de marzo hasta principios de mayo, con un rendimiento de alrededor de 4,5 t ha^{-1}. En ciertos sectores del potrero se obtuvieron rendimientos de hasta 15,0 t por cuadra, equivalentes a 9,5 t ha^{-1} (Anríquez, 1934).

En 1934 se destacaron las siembras de 31,4 ha de don Alejo Rubio, otra de 44 ha de don Vicente Villagra en el fundo El Arrozal, ambas en la localidad de Graneros, y la siembra de 31,4 ha de don Aníbal Berríos, en el Fundo El Castillo, en la localidad de Lonquén. Entre las variedades sembradas en esa época se pueden mencionar ´Moscado` (Argentina), ´Precoce Allorio`, ´Precoce Novella` y ´Nero Vialone` (Italia), ´Americana1600` (U.S.A.), ´Japonesa`, y ´Cayapé` (brasileña) (Anríquez, 1934). Otras variedades sembradas en la época fueron ´Jamaica`, ´Vialone`, ´Early 1600`, ´Lady Wright`, ´Kiushu`, ´Early Prolific`, ´Fortuna`, ´Carolino`, ´Honduras`, ´Edith`, ´Blue Rose` y ´Hamburgo` (Silva, 1937).

En el año 1939 se inician los primeros estudios más sistemáticos de mejoramiento genético del arroz, por el Departamento de Genética y Fitotecnia del Ministerio de Agricultura (Astorga, 1944; Uribe, 1955), a cargo de los señores Ricardo Hepp y Juan Theune. El primer trabajo consistió en la colecta de 10.000 panojas desde siembras de arroz, con las cuales se comenzó un trabajo de selección que se continuó hasta la década siguiente, en la Estación Genética de Ñuble (Alvarado y Hernaíz, 2014).

Durante la época existían escasos conocimientos técnicos para realizar una siembra de arroz en el país. Sin embargo, Silva (1937) puso a disposición de los agricultores una recomendación técnica bastante moderna para la época, la que, por su interés histórico, se resume a continuación.

En relación al clima, se planteaba que el arroz es una planta de clima cálido, por lo cual, las bajas temperaturas son un factor limitante, ya que producía esterilidad floral (vanazón) y reducción en el rendimiento. La temperatura mínima para el desarrollo de la planta es de 12 °C y la media 18 °C. En relación a la humedad, manifiesta que se debía disponer de suficiente agua, ya que el cultivo se realizaba bajo riego. En este sentido, señala que la disponibilidad de agua al momento de la siembra podía ayudar a obtener una germinación más uniforme, economizar agua de riego y realizar las siembras en épocas adecuadas, lo que permitiría realizar la cosecha fuera de la época de las lluvias, facilitando las labores de siega, recolección y obtención de un grano de buena calidad.

El suelo debe ser plano o ligeramente inclinado que permita tener cuadros amplios, una altura de agua uniforme que posibilite un desaguado rápido en el momento de la siega para la entrada de los equipos de cosecha. El suelo debe tener una estructura fina (arcillosa o limosa), poco profundo, y con un subsuelo impermeable, con un buen contenido de calcio, potasio, fósforo y no ser muy pobre en nitrógeno.

El suelo debe ser preparado con anticipación, en la estación seca, para eliminar malezas y mejorar su condición física, recomendándose una rotación con una leguminosa. La preparación de suelos debe ser similar a la utilizada en otros cereales, es decir, realizar una aradura superficial seguida, a los 15 d o tres semanas, por dos rastrajes en sentido transversal a la labor anterior. Si el suelo es muy arcilloso o estuvo cubierto con pasto, puede ser conveniente hacer una segunda aradura más profunda y cruzada, seguida de un rastraje.

Una vez preparado el suelo, se debe proceder a realizar las curvas de nivel con una diferencia de altura de 10 cm. Posteriormente, se puede usar un ´zanjador` (dos láminas de fierro en V) que se pasa en ambas direcciones sobre la curva de nivel para formar el pretil. Los pretiles deben tener uno a dos metros de ancho en la base y 40 cm de altura, que después de asentado el suelo, quedan de 20-25 cm. A continuación, eligiendo las partes más altas, se realizan los cortes en el pretil para colocar las compuertas de madera, que permitirán el paso del agua de un cuadro al otro, teniendo en cuenta que los pasos de agua no queden uno en dirección de otros, para evitar la formación de corrientes. Si es posible, se debe nivelar al interior de los cuadros, usando palas tipo Fresno, de tamaño medio, para que sean tiradas por bueyes, caballos o mulas.

La siembra se puede realizar en forma manual, al voleo, o con máquinas dotadas de un ventilador o máquinas provistas de tolva. Una vez realizada la siembra, se pasa un rastrillo de discos para tapar la semilla. Otro sistema de siembra que se puede utilizar es el conocido como ´de pies o plantones` que permite una menor pérdida de semilla, un crecimiento más vigoroso de la planta y una mayor uniformidad de la siembra. Este sistema consiste en realizar la siembra en surcos, a poca profundidad donde se va depositando la semilla en pequeños hoyos, distanciados a 30 cm. Una vez hecha la siembra, la semilla se tapa con una rastra de ramas, evitando pisar la hilera. Para las siembras al voleo se deben usar entre 79-114 kg ha^{-1} y si la siembra es a máquina, entre 68-91 kg ha^{-1} a una profundidad de 5 cm. La dosis de semilla a utilizar debe estar en relación inversa con la fertilidad del suelo.

La fecha de siembra dependerá de la temperatura y el contenido de humedad del suelo y se puede realizar desde el 20 de septiembre hasta el 30 de octubre. Si la humedad del suelo no es suficiente, se debe regar inmediatamente después de la siembra. Sin embargo, esta práctica no es muy recomendable, ya que se puede perder alto porcentaje de la superficie sembrada, debido a la acumulación del agua en algunos sectores del potrero, por los problemas de la desnivelación de los suelos.

En el caso del arroz ´acuático`, es preferible esperar que el arroz tenga unos 20 cm de altura para realizar el primer riego; de esta manera se logra vigorizar la planta y facilitar el desarrollo normal de la raíz. Después de este tiempo se debe iniciar el riego permanente. El sistema de riego utilizado consiste en abrir las compuertas que alimentan los cuadros superiores y dejar que el agua sature el suelo y alcance una altura de 5 cm, para darle paso al cuadro siguiente, donde se repetirá este procedimiento hasta inundar todos los cuadros. Cuando todos los cuadros están inundados, se procede a subir la altura del agua hasta los 15 a 20 cm, la que se mantendrá constante hasta la aparición de las primeras panojas. En este momento se quita el agua por espacio de ocho a 12 d, para volver a llenarlos hasta que la panoja empiece a doblarse, por el peso de los granos. En este estado se suspende la entrada del agua por 8 d para, posteriormente, proceder a iniciar el drenaje de los cuadros. En el caso de lluvias, se pasa el arado sobre los pretiles, para acelerar el drenaje de los cuadros y facilitar la cosecha posteriormente. La cantidad de agua que utiliza el arrozal es muy variable y puede variar entre 1 a 2 L s^{-1} ha^{-1}, pero en algunos casos puede llegar a más de 5 L s^{-1} ha^{-1}.

Cualquiera sea la variedad elegida, la semilla debe estar libre de malezas, tener un buen poder de germinación y un buen peso (densidad). El agricultor puede producir su propia ´semilla`, para lo cual debe elegir un terreno homogéneo, darle un manejo óptimo y cosechar la semilla en forma separada del resto de la producción. En el país se han probado una gran cantidad de variedades, tales como, ´Jamaica`, ´Early 1600`, ´Vialone`, ´Kiuski`, ´Lady Wright`, ´Early Prolific`, ´Fortuna`, ´Carolino`, ´Hondura' y ´Edith`.

El uso del agua no es suficiente para control de las malezas en el arrozal, por lo cual es importante realizar el control manual de ellas. Si la superficie es pequeña y hay pocas malezas, se puede suspender el riego por unos pocos días, para realizar el control de las malezas; de lo contrario, el control de malezas se debe realizar con el arrozal inundado. Las malezas más comunes de

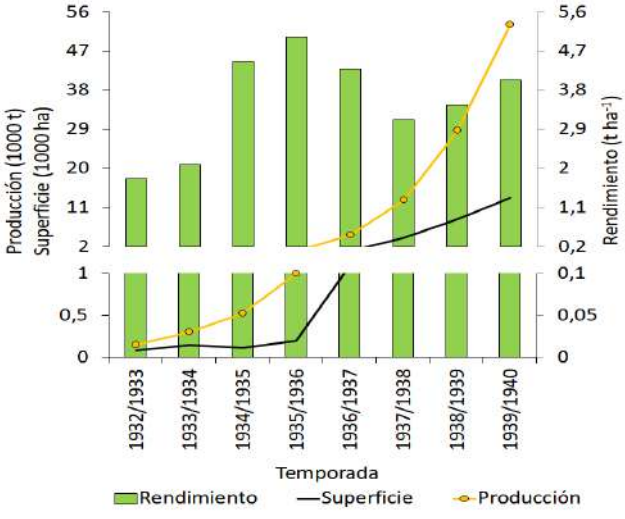
los arrozales son el frijolillo, variedades de leguminosas que producen semillas que son difíciles de separar por densidad del arroz y producen pérdidas del valor del producto. Otro tipo de malezas son los juncos, *Cárex* y gramíneas acuáticas como ´barbarroja` (por el color rojo de su inflorescencia), el ´hartón`, yerba del agua, potra, zarza, entre otras.

Si la superficie es pequeña, lo más práctico es la cosecha manual, pero en superficies superiores a cinco ha es preferible utilizar trilladoras. El período de cosecha depende de las variedades (120 a 180 d después de la siembra) y fechas de siembra. Sin embargo, esta labor se puede realizar desde fines de febrero hasta fines de abril, cuando la siembra se realiza los primeros días de octubre hasta fines de noviembre. La cosecha se realiza cuando el grano está maduro, es decir, cuando la panoja se dobla, quedando la punta más baja que la base, las glumas que recubren el grano se vuelven amarillas y secas, el grano se torna duro y transparente, el raquis de la panoja está seco y quebradizo, aunque las hojas y las cañas se mantengan verdes.

Cosecha del arroz en pequeñas superficies se puede realizar en forma manual, segando con la echona y luego transportarlo en gavillas hasta cerca de la casa para secarlo. Es importante, amontonar las gavillas con los granos hacia arriba en pequeños montones para, posteriormente, trillar a golpes. La trilla a golpes consiste en golpear las gavillas contra un trozo de madera, recogiendo el grano en una lona para limpiarlo, utilizando el viento y el zarandeo.

En el caso de la trilla mecánica, la alimentación de la máquina se realiza por medio de carros o carretas, tirados por mulas, caballos o bueyes, en los que descargan las gavillas en forma manual o con horquillas. Los sacos de arroz trillados se dejaban sobre paja seca de arroz, para que el grano no se humedezca. El porcentaje de humedad del grano requerido por la industria era de 14 %, lo que se reconocía en forma práctica cuando el grano soltaba la cáscara fácilmente, sin quebrarse. El rendimiento era muy variable, ya que dependía de múltiples factores. Sin embargo, se podía estimar entre 2.000 a 2.400 kg ha^{-1}, aunque algunos agricultores podían cosechar entre 3.500 a 4.000 kg ha^{-1}.

Durante la década de 1930 el cultivo del arroz continuó su desarrollo, alcanzando una superficie sembrada de 13.190 ha en la temporada 1939-1940, lo que significó un aumento considerable de superficie sembrada, si se compara con las 84 ha sembradas en la temporada 1932-1933 (Figura 2). Este aumento de la superficie sembrada estuvo aparejado con un considerable aumento del rendimiento de 1,8 a 4,0 t ha^{-1}, en las mismas temporadas mencionadas anteriormente (Figura 2).

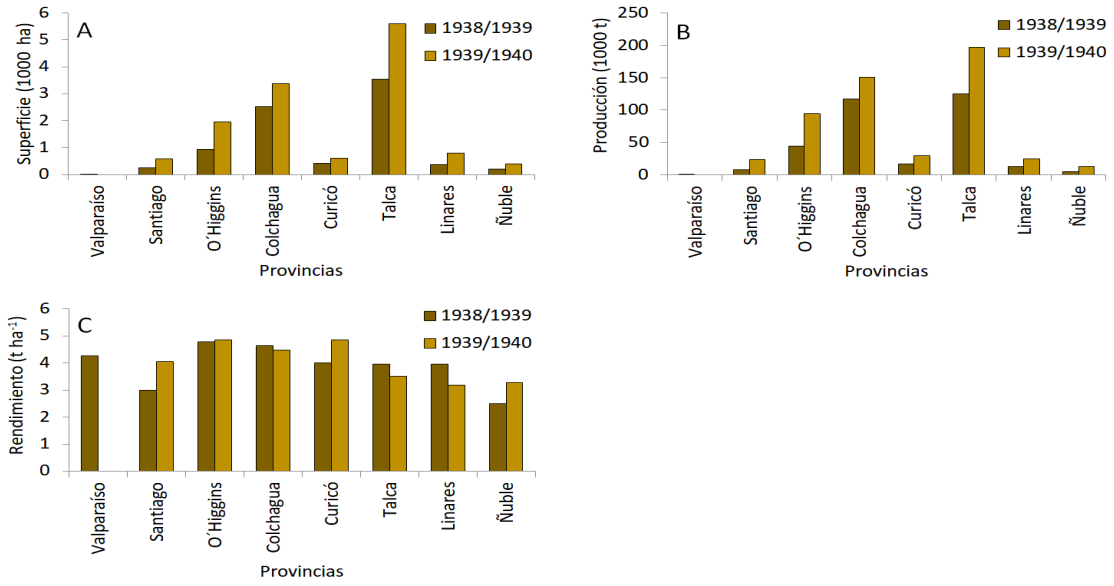


Fuente: Sims, 1960.

Figura2. Superficie (1.000 ha), producción (1.000 t) y rendimiento (t ha^{-1}) de arroz entre las temporadas 1932-1933 y 1939-1940.

La información obtenida de la experimentación realizada por los agricultores, previo a la década del 1930, permitió delimitar la zona de producción de arroz entre las provincias de Valparaíso y Ñuble (Cuadro 4). Aunque la zona al norte de Valparaíso poseía buenas condiciones climáticas para el desarrollo de la planta arroz, no contaba con suficiente agua para el cultivo. Por el contrario, la zona más al sur de la provincia de Ñuble, poseía condiciones climáticas adversas para el crecimiento de la planta (Villalobos, 1941).

La primera información provincial de la distribución de la producción de arroz señala que las provincias de Colchagua y Talca concentraron la mayor superficie sembrada en estas dos temporadas (Figura 3), sin embargo, los mejores rendimientos se obtuvieron en las provincias de O´Higgins y Curicó, con casi 4,9 t ha^{-1} (Figura 3 A, B, C). Estos rendimientos eran similares a los obtenidos en Italia (5,0 t ha^{-1}), España (4,7 t ha^{-1}) y Japón (3,4 t ha^{-1}) y muy superiores a los obtenidos en India (1,5 t ha^{-1}), en la misma época. En esa época se destacaba la siembra realizada en 1939 en la zona de Talca, en los suelos de ´Paniagua` por el Sr. Sone, utilizando semilla de origen japonés, y el Sr. Hata, ambos con buenos resultados (Gil, 2012).



Fuente: Villalobos 1941.

Figura 3. Superficie (1.000 ha), producción (1.000 t) y rendimiento (t ha^{-1}) de arroz por provincias. 1938-1939 y 1939-1940.

Este desarrollo del cultivo cimentó las bases para la formación de una industria pujante y de empresarios agrícolas que sembraban en grandes extensiones. Es así como, para mediados y finales de la década de 1930, el arroz se transformó en el mejor negocio agrícola, que proveía buenas ganancias, que se podía realizar en grandes superficies, con posibilidades de crédito, sin necesidad de contar con un capital importante y a un bajo costo. Como el cultivo se realizaba en ´suelos nuevos` que no habían sido cultivados anteriormente, no era necesario usar fertilizantes, ni pesticidas, requiriéndose sí de una amplia disponibilidad de mano de obra para realizar las labores de riego y cosecha, trabajo que era complementado con el uso de trilladoras estacionarias para la cosecha (Sims, 1969). En esta misma época, en el año 1939, el Ministerio de Agricultura, por intermedio del Departamento de Genética y Fitotecnia, reinició los estudios sobre el cultivo del arroz (Astorga, 1944; Olate, 1950; Torrealba, 1956).

Este auge de la producción arrocera fue apoyado también por las obras de reconstrucción, posterior al terremoto de 1939, que favoreció a varias áreas de la economía del país, entre ellas la agricultura y el cultivo del arroz. Por ejemplo, en esa época se llevó a cabo la construcción del embalse ´Bullileo` (1931-1946) y, posteriormente, el embalse ´Digua` (1954-1968) en la zona de Parral, los que permitieron la transformación del sector de ´Las Cauchas`, ubicado en el camino de Parral-Cauquenes, que estaba cubierto de espinos y cardos en una zona regada, y que pasó a ser sembrada con arroz. En esta zona, un agricultor pionero en la siembra de arroz fue el Sr. Manuel Olivares, seguido posteriormente por los Sres. Luis A. Pinochet, Enrique Astorga, Agustín Retamal y Miguel Núñez, entre otros (González, 2018).

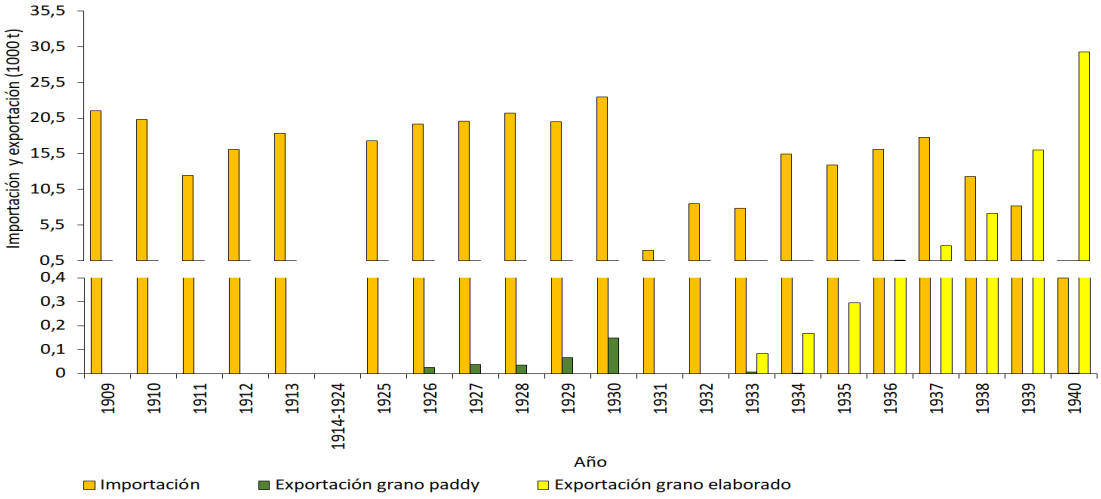
Industria arrocera

A nivel nacional se empezó a establecer también una industria elaboradora de arroz, con una capacidad instalada en constante aumento. Es así como, en el año 1938 había nueve molinos arroceros, con una capacidad instalada de 50 mil toneladas, ubicados entre las ciudades de Valparaíso y Talca. De estos nueve molinos, tres estaban ubicados en la ciudad de Santiago y poseían el 50 % de la capacidad instalada del total del país (Mardones y Cox, 1942). La primera industria arrocera en la zona de Parral fue INAPAR, de propiedad de los Sres. Rubio, Fraumeni y Mataraki, que estuvo ubicada en la avenida Aníbal Pinto (Morales, 2015).

Todo este desarrollo del sector arrocero, se vio reflejado en: a) el mejoramiento del estándar de vida de un grupo importante de personas muy pobres provenientes de vastos sectores de agricultura y ganadería; b) la incorporación de nuevas zonas de riego antes no regadas; c) el uso productivo de un suelo de baja calidad y de escasa utilidad para una actividad económica más rentable; d) la creación de una importante fuente de trabajo en el campo, en el transporte y en el comercio; y d) un ingreso y/o ahorro de divisas producto de las exportaciones de arroz y reducción de las importaciones (Sims, 1966; 1969; Anríquez, 1934; Villalobos, 1941).

Comercio

El rápido desarrollo del cultivo del arroz llevó al autoabastecimiento del país en el año 1939 (Koller, 1958). En este punto, los principales países que habían abastecido de arroz al país eran Italia, U.S.A., Alemania, Ecuador, Brasil, Egipto, India, China, Japón, Argentina y Uruguay. A pesar de haber sido importador de arroz, Chile también exportó o más bien re-exportó pequeñas cantidades entre los años 1926 a 1930 (Figura 4). Sin embargo, entre 1933 y 1939, se exportó arroz producido en el país (y posiblemente también se re-exportó) principalmente a Bolivia, Argentina y Perú y algunos países europeos. Esta situación llevó a los agricultores arroceros a plantear que ellos podrían exportar arroz nacional a los países de Sud y Centroamérica, pero que necesitaban del apoyo del Estado en la dictación de ciertas medidas de protección para llevar a cabo este desafío (fijación de primas de producción, concesión de préstamos con bajo interés a través de instituciones fiscales, protección aduanera por medio de la fijación de impuestos a la importación del producto y/o fijación de primas de exportación), ya que la exportación de arroz dependía del precio del producto y los costos de producción (Anríquez, 1934; Astorga, 1944).



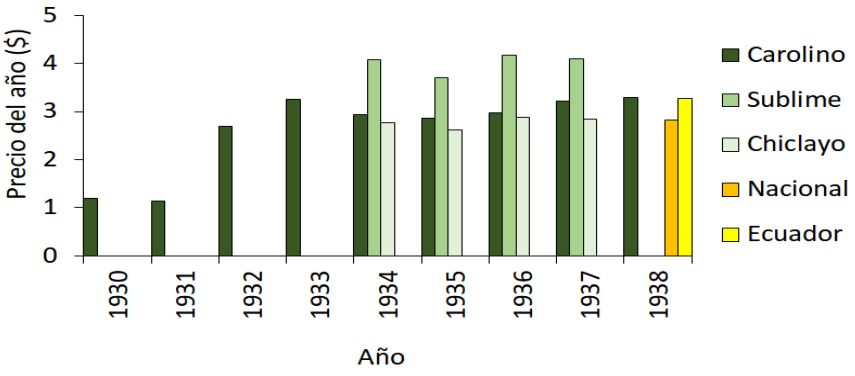
Fuente: Anríquez, 1934; Villalobos, 1941.

Figura 4. Importación (1.000 t), exportación de grano paddy y elaborado (1.000 t) de arroz entre 1909 y 1940.

Para la comercialización del arroz paddy no existía una legislación ni norma nacional, por lo cual, las transacciones comerciales del arroz entre el agricultor y la industria eran fijadas por esta última y se basaba, principalmente, en las características que debía cumplir el producto y los límites y tolerancias de los defectos. Este sistema no contemplaba ningún tipo de bonificación que incentivara a mejorar la calidad del producto producido.

A fines de la década de 1930, el rendimiento industrial del arroz era de un 37 %; es decir, que de 100 kg de arroz paddy se obtenían 37 kg de arroz de grano entero, 19 kg de grano quebrado y 6 kg de grano puntas, o alrededor de 56 % de arroz para la venta directa en el comercio. Por otro lado, los subproductos se comercializaban para su uso en otras industrias (Opazo, 1939), como la harinilla para la producción de concentrados, el aceite para la producción de jabones, las puntas de arroz para su uso en las cervecerías y la cáscara para las fábricas de ladrillos (Uribe, 1955).

El comercio del arroz pulido a nivel del consumidor estaba regulado por el Estado, a través del Comisariato General de Subsistencias y Precios, organismo que fijaba los precios para el comercio del arroz elaborado (Figura 5) y paddy.



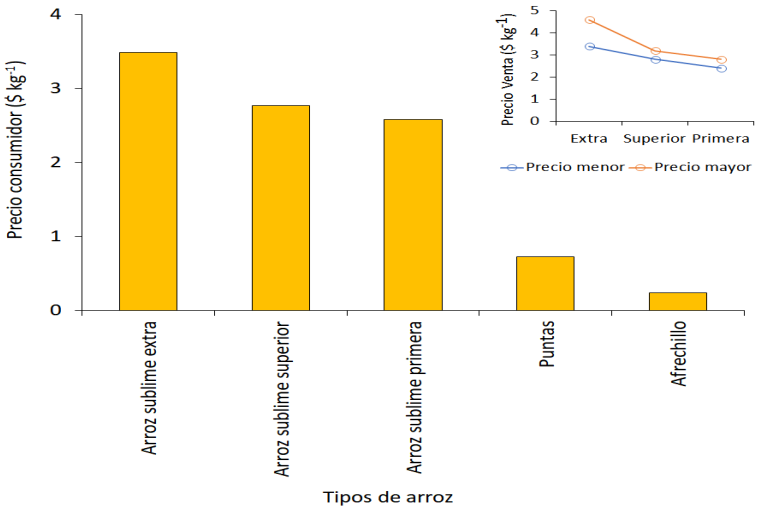
Fuente: Villalobos, 1941.

Figura 5. Precio del año ($) del arroz elaborado por tipo, entre 1930 y 1938.

A partir de 1939 se establecieron tres categorías de arroz elaborado: arroz sublime extra (primera calidad), arroz sublime (segunda calidad) y arroz sublime primera (tercera calidad), las que podían ser abrillantadas o no abrillantadas. Estas categorías de arroz debían cumplir con los siguientes requisitos:

El arroz sublime extra permitía un cinco (5 %) como máximo de granos partidos. Sus granos debían ser uniformes en el tamaño, brillantes y transparentes (glaseado) o blanco, poseer granos sin estrías rojas, sin impurezas, libre de enfermedades (sano), sin alteraciones y comerciable. El arroz sublime superior aceptaba un 20 % como máximo de grano partido, debía poseer un grano uniforme y regular en su tamaño, brillante y transparente (glaseado) o blanco, contener granos sin estrías rojas, con tolerancia a algunas semillas de hualcacho, ser sano, sin alteraciones, y comerciable. El arroz sublime de primera, podía contener un 40 % de grano partido, como máximo. No había una exigencia en la uniformidad en el tamaño del grano, brillantez y transparencia (glaceado) o blancura, granos sin estrías rojas y con mayores tolerancias a cantidades de hualcacho. Sin embargo, el grano debía presentar una apariencia sana, sin alteraciones y ser comerciable (Astorga, 1944).

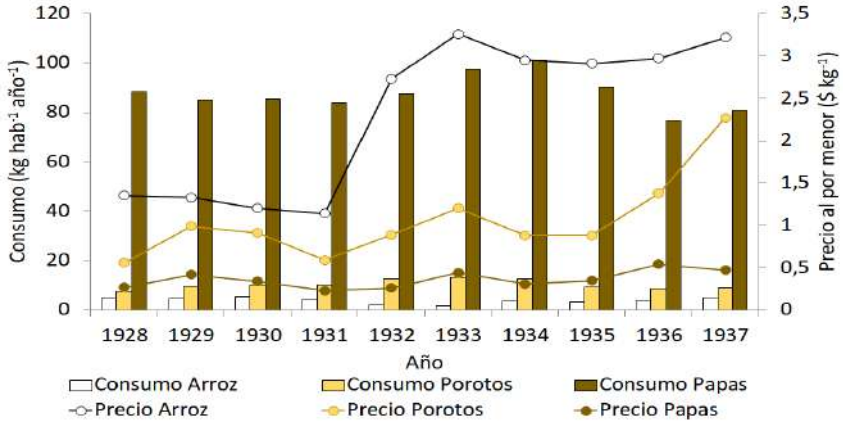
La venta de las puntas y medianas estaba prohibida, para evitar posibles adulteraciones en la comercialización del arroz. El control de esta reglamentación a nivel de comercio minorista estaba a cargo de inspectores gubernamentales. El valor del arroz estaba relacionado directamente con el porcentaje de grano entero. Es así como el mayor valor comercial era para el arroz sublime extra que poseía un mayor porcentaje de grano entero que el sublime primera (Figura 6).



Fuente: Villalobos, 1941.

Figura 6. Precios de la época ($ kg^{-1}) de arroz por tipo de arroz en el año 1939.

Datos disponibles de la época permiten señalar que el consumo per cápita promedio de arroz Carolino, en el período 1928 y 1937, fue de 3,9 kg hab^{-1} año^{-1}, menor al consumo de porotos y papas. Al comparar el precio del arroz, éste era superior al de los porotos y las papas (Figura 7).



Fuente: Mardones y Cox, 1942.

Figura 7. Consumo de arroz Carolino, porotos y carne (kg hab^{-1} año^{-1}) y su precio de la época ($), promedio anual.

A pesar del progreso obtenido durante las primeras décadas del cultivo del arroz, los principales problemas tecnológicos que necesitaban ser abordados en los próximos años, se podían resumir en los siguientes puntos.

1. Escaso conocimiento técnico del cultivo por parte de los agricultores, aunque a través de la prueba y el error se había logrado delimitar la zona de producción entre la provincia de Aconcagua a la provincia de Ñuble, ocupando la zona poniente del Llano Central.
2. Falta de variedades adecuadas a las distintas zonas de producción. A pesar de que se había logrado seleccionar algunas variedades, la presencia de variedades muy tardías, de bajo rendimiento y ausencia de semillas de buena calidad, seguía siendo un problema a solucionar.
3. Aumento de malezas típicas del cultivo del arroz, como hualcacho (*Echinochloa* spp.) y hualtata (*Alisma plantago*), debido al monocultivo, ausencia de rotación de cultivos y falta de métodos de control eficaces.
4. Agotamiento de los suelos por la falta de aplicación de fertilizantes, deficiente control de malezas y falta de rotaciones.
5. Baja calidad del producto cosechado debido a la alta humedad de cosecha y al mal manejo de poscosecha.

Desarrollo de la institucionalidad y enseñanza agrícola

Antecedentes históricos relacionados con la investigación en arroz en Chile

En el país, el Ministerio de Agricultura y las instituciones de investigación surgieron sólo a fines del siglo XIX o comienzos del siglo XX. A partir de 1830, el Gobierno se esforzó por reactivar la producción agrícola y minera, estancada por las convulsiones del proceso de la independencia. Para lograr tales propósitos, impulsó el uso de maquinarias, mejoró el transporte, extendió las obras de regadío e impulsó la colonización de algunas zonas del país.

En 1838 se creó la Sociedad Nacional de Agricultura (SNA), que editó la revista ´El Agricultor` en el año 1838. En 1841, el Gobierno de Chile adquiere un predio con el objeto de crear un campo experimental agrícola y educacional. Por decreto de 12 de diciembre de 1842, el Presidente Bulnes aprobó el Reglamento Administrativo para la creación de la Quinta Normal de Agricultura,

que pasó a llamarse Quinta Normal de Agricultura y en 1842 se crea la Escuela Práctica de Agricultura que tenía por objetivo capacitar a los trabajadores agrícolas del país. En 1876 se crea el Instituto Agrícola de Chile, encargado de entregar una enseñanza de grado superior. En 1849 se establece el Banco de Chile de Arcos y Cía.; en 1854 la Casa Comercial Bezanilla, McClure y Cía., en 1855 la Caja de Crédito Hipotecario y en 1884 la Caja de Ahorro Agrario. En 1856 se publica la revista ´El Mensajero de la Agricultura` y en 1869 la nueva revista ´El Boletín`, que duró hasta 1870, dependientes de la SNA. En ese mismo año se organiza la Exposición Agrícola, destinada a promover diferentes actividades agrícolas, pecuarias y de mecanización. En 1885 se plantea la creación de la Estación Agronómica por parte de la SNA, como una respuesta a la aparición de plagas exóticas que atacaban a diversas especies de plantas introducidas al país, la que se establece en 1925. En 1877 se funda el Hospital Veterinario y en 1882 se crearon varias Escuelas Prácticas de Agricultura en provincias (Correa, 1938).

En 1904 se inicia la Escuela de Agronomía de la Universidad Católica de Chile y en 1905 la Escuela Militar Veterinaria, la que da paso a la Escuela de Medicina Veterinaria en el año 1915. En 1905, el Instituto Agrícola de Chile reorganiza su plan de estudios, amplía la duración y el contenido de su programa, que lo habilita para entregar el título de Ingeniero Agrónomo. Diez años después, en 1915, pasa a llamarse Instituto Agronómico de Chile. Ese mismo año se establece la Dirección General de los Servicios Agrícolas, encargada de fomentar la enseñanza y algunas actividades agrícolas específicas. Como la Dirección General de los Servicios Agrícolas no tenía la facultad de establecer Políticas Agrícolas a nivel nacional, mediante el Decreto Ley N°43 de 1924, se creó el Ministerio de Agricultura, Industria y Colonización que sería el encargado de fijar la estrategia de desarrollo agrícola nacional y coordinar las actividades de los diferentes servicios. Mediante el Decreto Ley N° 178 de 1924, se determinó los servicios que dependían del Ministerio y la Dirección General. Éstos fueron el Instituto Agrícola, la Escuela Práctica de Agricultura de Santiago, la Estación Agronómica, Estación de Patología Vegetal, Estación Enológica, Servicios de Sanidad Animal, Servicios de Bosque, Pesca y Caza, Inspección de Escuelas Agrícolas Provinciales, Servicios de Viveros, Parque y Jardines, Aves de Corral, Jardín Botánico, Clínica Veterinaria, Estudios Económicos de la Producción, Mercados y Control de Exportaciones y Divulgación y Propaganda.

Los Decretos Leyes N° 176 y 177 establecieron la protección sanitaria animal y vegetal, y el Decreto Ley N°98 de 1924 reguló el comercio de fertilizantes y en 1925 se promulgó la Ley de Semillas. Por otra parte, las funciones de crédito fueron asignadas a la Caja de Crédito Agrario, creada en 1929 la que, en 1953, junto a otros organismos, pasó a constituir el Banco del Estado de Chile. Durante ese mismo año, el DFL N° 185 aprobó el Estatuto Orgánico del Ministerio de Agricultura que estaba compuesto por la Subsecretaría, la Dirección Nacional de Agricultura y la Dirección Nacional de Pesca y Caza (Correa, 1938).

En 1927 el Instituto Agronómico fue traspasado a la Universidad de Chile que lo transformó en la Facultad de Agronomía y Medicina Veterinaria, las que se independizaron en 1938, en la Facultad de Agronomía y la Facultad de Medicina Veterinaria (Correa, 1938). En el mismo año, se eliminó el Ministerio de Agricultura y sus funciones pasaron al Ministerio de Fomento y se crea el Departamento de Agricultura; restableciéndose el Ministerio de Agricultura el año 1930**.** En 1931, el Ministerio de Agricultura crea el Departamento de Genética y Fitotecnia, dotado de estaciones experimentales en la zona norte (Ovalle y Los Andes), central (Cauquenes, Chillán y Los Ángeles) y austral (Osorno y Puerto Octay). En 1939 el Departamento de Genética y Fitotecnia da un mayor impulso a la investigación, creándose los programas de maíz, trigo, cebada y papa, enfocados, principalmente, hacia la producción de semillas mejoradas y al estudio de adaptación de variedades extranjeras (INIA, 2014).

II. Producción de 1940-1964

Durante el período comprendido entre 1940 y 1950, las condiciones económicas continuaron favoreciendo el aumento en la producción del cultivo del arroz en el país. En este sentido, se

planteaba que el mayor acierto de los agricultores había sido la introducción del cultivo del arroz al país con resultados favorables (Hartard, 1943). Es así como se indicaba que su cultivo había favorecido: a) la disminución de las importaciones, logrando un abastecimiento total de las necesidades de la población, en el año 1941, y un ahorro importante de divisas para el país; b) mayores oportunidades de empleo; y c) un mejor aprovechamiento de nuevos suelos con limitaciones para la siembra de otros cultivos. En el aspecto social, el cultivo había favorecido: a) el pago de mejores salarios, aumentando el poder adquisitivo de los trabajadores arroceros y proporcionado un mayor bienestar social; b) un mayor desarrollo económico en las zonas arroceras que antes estaban desatendidas; c) la construcción de nuevas obras de regadío, caminos y viviendas; y d) la formación y desarrollo de una industria molinera, medios de transporte y maquinaria.

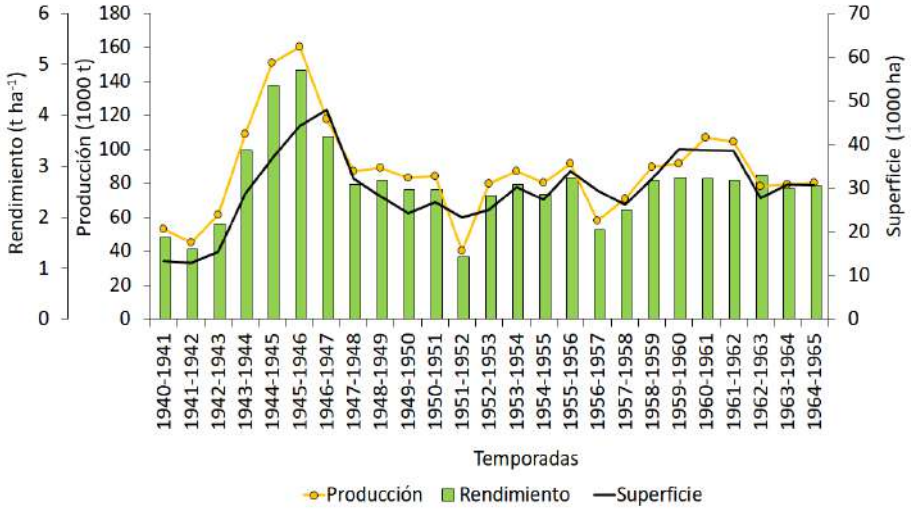
Desde el punto de vista alimenticio, el arroz era un alimento sano, con un alto contenido en carbohidratos, bajo contenido de proteínas, pero muy asimilable, que había contribuido a la alimentación del pueblo y a la utilización de sus subproductos en otras actividades económicas (Villalobos, 1941; Olate, 1950; Torrealba, 1956). Finalmente, la introducción del cultivo del arroz al país había significado una demostración contundente de la capacidad de nuestra agricultura para adaptarse a las exigencias del mercado, y de los agricultores que, sin la ayuda fiscal ni derechos proteccionistas ni medidas de fomento, habían llevado a cabo esa importante iniciativa (Keller, 1956).

Características económicas de la producción

El largo trabajo de prueba y error realizado en los años previos al comienzo de la Segunda Guerra Mundial, permitió a los chilenos disponer de este alimento durante el conflicto (Hartard, 1951), a un precio conveniente (Villalobos, 1941), evitando que la población nacional se viera limitada en el consumo arroz, como sí ocurrió con otros productos alimenticios (Hartard, 1943).

Estimaciones realizadas en la época indican que el área de suelo disponible para ser sembrada con arroz era de 50.000 ha, lo que implicaba disponer de una superficie total de 200.000 ha, considerando una rotación del cultivo de cuatro años (Olate, 1950; Torrealba, 1956).

Desde 1940 a 1964 la superficie sembrada de arroz pasó de 13 a 38 mil ha, mientras que la producción nacional lo hizo desde 45 a 160 mil toneladas, con un rendimiento promedio nacional que varió entre 1,2 y 4,8 t ha^{-1}, aproximadamente (Figura 8).



Fuente: Ministerio de Agricultura, 1970.

Figura 8. Superficie (1.000 ha), producción (1.000 t) y rendimiento (t ha^{-1}) de arroz, entre las temporadas 1940-1941 y 1964-1965.

El período 1933-1946 fue la época de mayor desarrollo del arroz en Chile y se compara a lo ocurrido con la ´fiebre del oro`, ya que se constituyó en el mejor negocio agrícola. En este período, se conocieron agricultores que sembraron 1.500 ha y que obtuvieron, algunos de ellos, rendimientos de 6,4 a 7,6 t ha^{-1} (Sims, 1959), superiores a varios países tradicionalmente productores en esa época, como Australia (4,5 t ha^{-1}), Italia (5,5 t ha^{-1}) y España (6,3 t ha^{-1}) (Hartard, 1943).

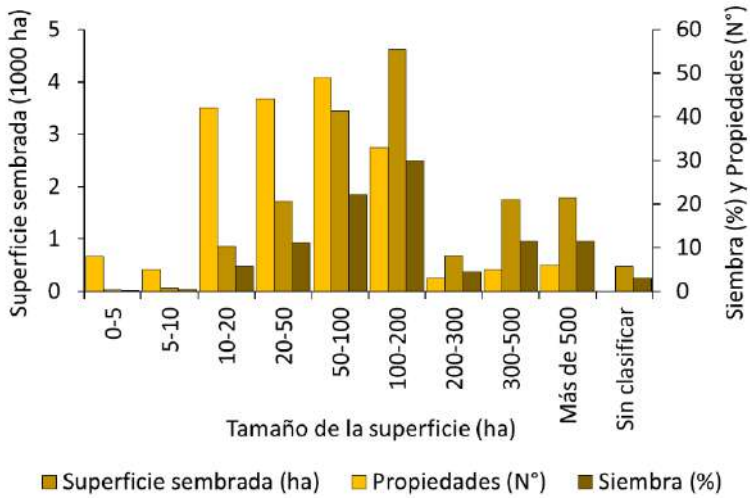
Un análisis del período comprendido entre 1940 y 1964, indicó que la mayor superficie sembrada se logró en el año 1946, con 48.000 ha, a partir de la cual se fue reduciendo paulatinamente hasta llegar a 23.415 ha en el año 1951 (Hartard, 1952; Sims, 1959), para luego subir levemente hasta el año 1959 (Hartard, 1954), y volver a bajar nuevamente en el año 1962. La mayor producción se obtuvo también el año 1945 con 149.817 t, cantidad que siguió la curva de superficie sembrada y se mantuvo desde 1946-47 hasta 1959 en aproximadamente 85.000 toneladas. El rendimiento siguió también a las curvas de superficie y producción, lográndose el mayor rendimiento en la temporada 1945-1946 con 4,9 t ha^{-1}, el que posteriormente se redujo hasta 2,8-3,0 t ha^{-1}. En 1951-52 las condiciones climáticas fueron bastante malas, lo que redujo el rendimiento a sólo 1,2 t ha^{-1} (Figura 8).

Los principales factores adversos que tuvo que enfrentar el cultivo de arroz en esa década fueron: a) problemas climáticos asociados a las bajas temperaturas que produjeron un alto porcentaje de esterilidad floral (´vanazón`) y afectó el llenado de grano; b) reducción de la fertilidad de los suelos, debido a su uso intensivo y al escaso o nulo empleo de fertilizantes; c) aumento de la infestación de malezas, entre ellas el hualcacho, que produjeron una reducción de producción y de la calidad del producto cosechado; d) aumento de los salarios y de los costos de producción, producto de la gran cantidad de mano de obra que utilizaba el cultivo y a la escasa mecanización. Estimaciones realizadas en la época indicaron que un 40 % del costo total de producción lo constituían los salarios, incluyendo rentas, intereses y amortizaciones (Olate, 1950; Torrealba, 1956); y e) bajo precio del producto (Anónimo, 1952). Debido a esta situación se produjo un desplazamiento de las siembras de arroz hacia el sur, en busca de terrenos más baratos, pero donde las condiciones climáticas eran menos favorables para el crecimiento de la planta (Torrealba, 1956).

La visión del gobierno de esos años, sobre el desarrollo del cultivo del arroz, estaba contemplado en las metas propuestas en el Plan de Desarrollo Agropecuario para 1960-1961 y 1970-1971, donde se estimaba una superficie sembrada de 40.000 ha para el año 1970. El objetivo de ese plan era producir una cantidad suficiente de arroz para abastecer el consumo nacional, estimular la actividad de la industria arrocera y ahorrar divisas al país, evitando las importaciones (Sims, 1959). Para lograr esos objetivos, se planteaba una estrategia que contemplaba el mejoramiento genético de las variedades existentes, la eliminación del cultivo de algunas áreas ´marginales` en la zona de Curicó al sur, el uso de ´semilla mejorada` que pudiera reemplazar a la ´semilla nacional`, el inicio de un proceso de certificación de semillas con participación de los agricultores, la industria y el gobierno (Sims, 1959; Anónimo, 1962). Esa estrategia planteaba que la semilla mejorada podía tener un fuerte impacto en el aumento del rendimiento y calidad de grano, para lo cual se proponía obtener un grano más uniforme, exento de grano rojo, y con menos pérdidas en el molino (Sims, 1959).

Distribución de la superficie sembrada

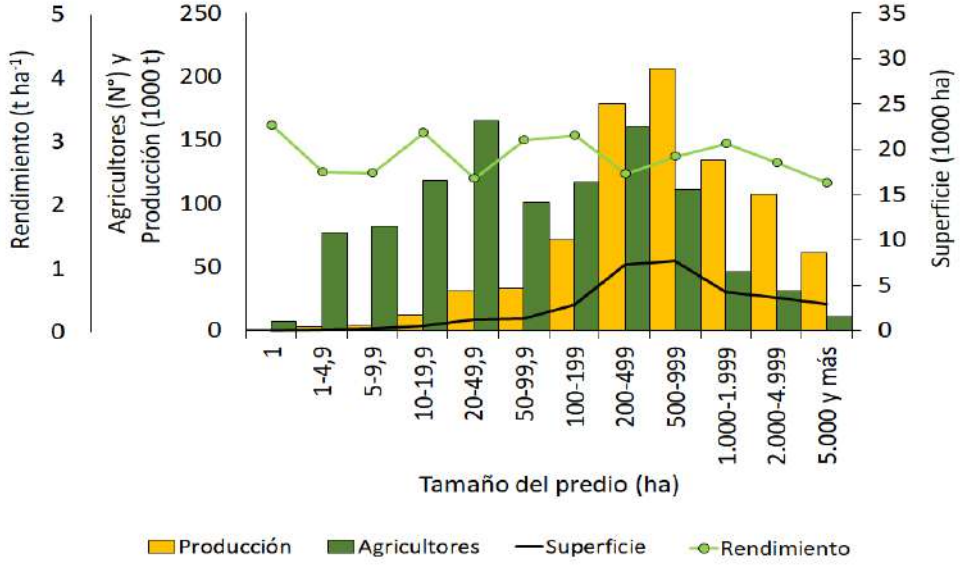
En la temporada 1941-1942, la superficie sembrada de arroz alcanzó a 15.425 ha, e incluía 195 propiedades en esa actividad, donde la producción estaba concentrada, principalmente, en la mediana propiedad (Astorga, 1944). Es así como el 60 % de las siembras lo realizaban 126 agricultores en superficies que fluctuaban entre 20 y 200 ha, el 16 % lo sembraban ocho agricultores en superficies entre 200 y 500 ha, y el 11,6 % lo sembraban seis agricultores en superficies de más de 500 ha (Figura 9). Los productores arroceros se dividían en propietarios y arrendatarios, donde el 25 % de la producción arrocera se obtenía de los suelos arrendados (Hartard, 1951; Torrealba, 1956).



Fuente: Astorga, 1944.

Figura 9. Superficie (1.000 ha), siembra (%), propiedades (N°) por tamaño de la superficie (ha), en la temporada 1941 y 1942.

El censo Agropecuario del año 1955 nos permite tener un mayor detalle de la distribución de la superficie sembrada con arroz. El total de agricultores que sembraron las 31.833 ha de arroz fue de 1.027. De ese total de agricultores, 11 sembraron en predios de superficie mayor a 5.000 ha, 77 agricultores en predios de entre 1.000 y 5.000 ha; 389 en predios de entre 100 y 500 ha; 218 agricultores sembraron en campos de entre 50 y 100 ha, y un reducido número lo hizo en predios con superficies menores a 50 ha (Figura 10).



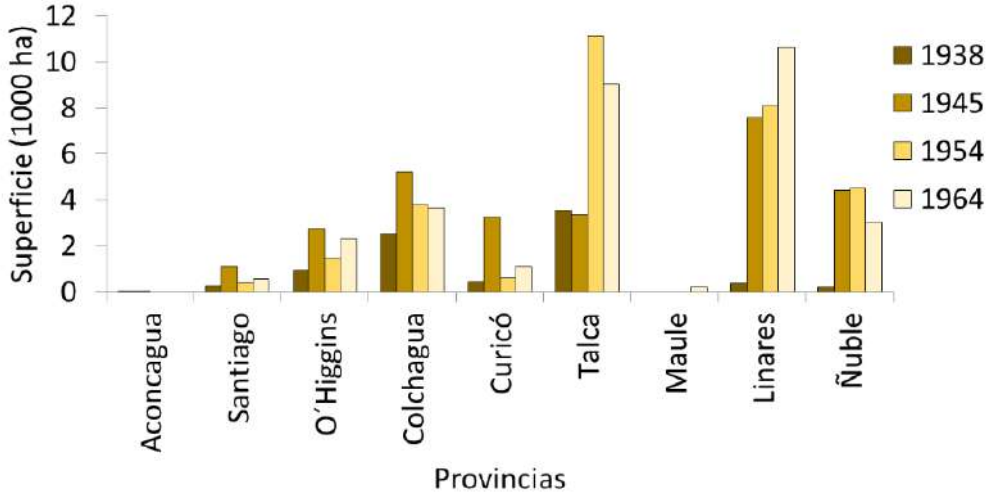
Fuente: Servicio Nacional de Estadísticas y Censos, 1955.

Figura 10. Agricultores (N°), superficie (1.000 ha), producción (1000 t) y rendimiento (t ha^{-1}), por tamaño del predio (ha).

Zonas de cultivo

El área productora de arroz estaba concentrada, principalmente, en la zona central del país, entre las provincias de Santiago y Ñuble (Figura 11). La comparación con la información de la temporada 1938-1939 señala que la superficie de siembra se fue extendiendo y ocupando lentamente los suelos más arcillosos ubicados hacia el sur de Santiago, que no eran aprovechados por el cultivo de chacras u otros cereales (Hartard, 1954). De esta manera, en el año 1945 se lograron importantes superficies de siembra en las provincias de Santiago, O´Higgins, Colchagua y Curicó. Pero desde 1954, Santiago empezó a perder importancia, lo que ya en 1964 permitió una mayor concentración de la superficie sembrada de arroz desde la provincia de O´Higgins al sur (Figura 9). La zona norte, que acogió a los primeros campos de experimentación del cultivo de arroz en la década de 1920, presentó problemas de disponibilidad de agua y desarrolló nuevas oportunidades para la producción de cultivos más rentables, por lo dejó de sembrar arroz. Por el sur, la comuna de San Carlos, perteneciente a la provincia de Ñuble, se constituyó como el límite sur del cultivo en el país.

En general, a medida que el cultivo se desplazaba hacia el sur, enfrentaba con mayor intensidad los problemas climáticos, donde las bajas temperaturas afectaban negativamente la germinación y el desarrollo de la planta de arroz (Villalobos, 1941; Torrealba, 1956), y las lluvias tempranas ocasionaban fuertes pérdidas en la cosecha, además de favorecer la presencia de un mayor contenido de humedad en el grano y un bajo rendimiento industrial (Elgueta, 1955).



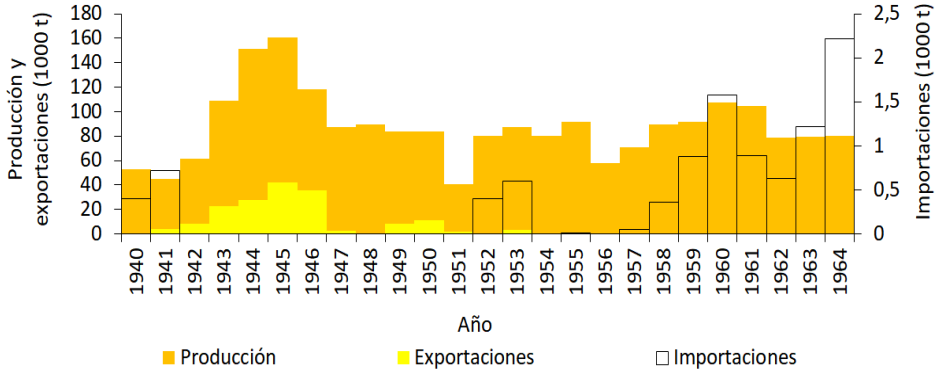
Fuente: Torrealba, 1956.

Figura 11. Superficie (1.000 ha) sembrada de arroz en el país, en los años 1938, 1945, 1954 y 1964.

Comercio exterior

El desarrollo del cultivo del arroz permitió, en el corto plazo, obtener una producción lo suficientemente grande como para abastecer la demanda nacional y poder exportar el excedente de la producción nacional (Hartard, 1948; Anónimo, 1952). La producción fue aumentando durante el período de guerra, llegando al nivel máximo de exportación en el año 1945, por lo que el arroz se convirtió en el principal producto exportable del país (Anónimo, 1952). En ese período, Chile llegó a ser el segundo exportador de arroz en Sudamérica. Sin embargo, esta situación duró sólo algunos años, debido a problemas de baja productividad y regulación de los precios (Hartard, 1943), por lo que las altas exportaciones realizadas en los años de la guerra

y los inmediatamente posteriores, pasaron a ser datos excepcionales (Hartard, 1951; Anónimo, 1952; Torrealba, 1956). Es así como 1947 fue un año de baja producción nacional, sólo lográndose satisfacer las necesidades del país, cuyo consumo había aumentado, razón por la cual el Gobierno prohibió la exportación del arroz. En el año 1949 se volvió a retomar la exportación del arroz, con excepción del año 1952, debido a la baja producción obtenida. Durante ese período, los principales mercados internacionales para el arroz nacional fueron Cuba, Perú, Bolivia, Alemania, Francia, Bélgica, Gran Bretaña y Checoslovaquia, entre otros (Anónimo, 1952). Durante el período 1940 a 1957, Chile importó arroz en algunos años específicos para suplir la demanda nacional, pero a partir de 1958 empezó a importar cantidades más importantes de arroz (Figura 12). Los principales abastecedores de arroz elaborado fueron Italia, U.S.A., Alemania, Ecuador, Brasil, Egipto, India, China y Uruguay. El arroz paddy (´pelay`) importado era utilizado como semilla para la siembra nacional, siendo su origen, principalmente, U.S.A. (Villalobos, 1941)**.** El consumo de arroz, desde 1940 a 1947, aumentó en forma importante, pasando de 6,8 kg a prácticamente 18 kg per cápita (Olate, 1950; Torrealba, 1956).



Fuente: Ministerio de Agricultura. 1970.

Figura 12. Producción nacional (1.000 t), importaciones (1.000 t) y exportaciones (1.000 t), entre los años 1940 y 1964.

Programa de investigación en arroz

En 1941 se establece la Estación Genética de Ñuble, en el sector de Ninquihue, cerca de la ciudad de Chillán (Astorga, 1944; Uribe, 1955), a cargo del Sr. Ricardo Hepp y una segunda Estación Experimental en Paine, cerca de Santiago (Alvarado y Hernaíz, 2014). Los principales estudios en estas Estaciones Experimentales se focalizaron en el mejoramiento genético para desarrollar nuevas variedades y en el uso de prácticas agronómicas tales como épocas de siembra, fertilización, dosis de semilla, manejo de agua, rotaciones, entre otras.

En el año 1944 se hace cargo de la Estación Genética de Ñuble el Ingeniero Agrónomo Sr. Guillermo Sims, quién continuó con el trabajo de selección de plantas iniciado anteriormente (Alvarado y Hernaíz, 2014). A partir de ese año se plantearon: a) nuevos criterios para el mejoramiento genético de evaluación y selección de germoplasma: introducir germoplasma de zonas que tuvieran una latitud y altitud similar a la del país, acompañado de estudios climáticos; introducir variedades de grano largo y grueso, debido a la tendencia mundial del consumo de ese tipo de grano, a pesar que el arroz producido en el país poseía un grano pequeño y redondo; b) tener una institución de investigación responsable de la evaluación y selección de las variedades introducidas, para evitar que este proceso lo realizaran los agricultores en superficies comerciales; c) promover la utilización de semilla proveniente de zonas con baja presencia de arroz rojo y; d)

evitar el ingreso de enfermedades que no estuvieran presentes en el país (Theune, 1941; Astorga, 1944; Sotomayor, 1954).

Posteriormente, en 1951, algunos particulares empezaron a incursionar en la evaluación de variedades. Por ejemplo, la Sociedad de Arroceros de Colchagua (SACOL), en la provincia de Colchagua (Villalobos, 1941), y en 1953 la Estación Experimental Huencuecho, ubicada en los alrededores de la ciudad de Talca (Uribe, 1955; Orrego, 2017). Por otro lado, las universidades también se interesaron en el desarrollo del cultivo. Es así como la Universidad de Chile y Universidad Católica realizaron diferentes estudios agronómicos y prospectivos de la situación del cultivo del arroz en el país, a través de memorias de título de estudiantes de agronomía, y la Universidad de Concepción se vio involucrada fuertemente en el desarrollo del Plan Chillán, dirigido por el Ministerio de Agricultura.

En 1953, el Plan Chillán, a través de su Programa de Extensión, empezó a apoyar el desarrollo del cultivo del arroz. En efecto, ese año se inició una campaña tendiente a organizar a los agricultores para mejorar las condiciones agronómicas del cultivo, especialmente relacionadas con el control de malezas y el uso de herbicidas. Por otro lado, para reducir el contenido de humedad del grano al momento de la cosecha y mejorar su calidad industrial, se instaló el primer equipo secador de grano de arroz en la ciudad de San Carlos (Elgueta, 1955).

Debido al éxito de estas acciones, al año siguiente se formó un Comité de Agricultores Arroceros para: 1) instalar un mayor número de secadores de arroz; 2) hacer un mejor uso de la maquinaria disponible y; 3) realizar experiencias tendientes a mejorar el nivel técnico del cultivo. En la temporada 1954 y 1955 se aplicó herbicida a 350 ha de arroz y el secador de grano alcanzó a secar 1.350 t (Elgueta, 1955). Estos buenos resultados alcanzados con el Plan Chillán, permitieron que el 10 de junio de 1954 se estableciera la Cooperativa de Productores de Arroz que fijaron los siguientes objetivos: 1) instalar una secadora y bodegas de arroz en la ciudad de San Carlos; 2) vender la producción de arroz de los cooperados; 3) mejorar la producción y comprar maquinaria para apoyar a los cooperados; 4) contratar préstamos para dar anticipos a los productores pagaderos a cosecha; y 5) adquirir un molino con apoyo del Banco del Estado (Elgueta, 1955).

La variedad más usada en los principios de esta época era la ´semilla nacional`. A fines de esa década, la variedad ´Lonquén` fue introducida al país por el Sr. Aníbal Berríos. Esa variedad fue fruto de un proceso de selección comenzado en 1934 por el Sr. Luis Rubio, y cuyo objetivo era reducir el porcentaje de desgrane y el arroz rojo (Villalobos, 1941).

Las variedades sembradas durante ese periodo emitían la panoja entre el 20 y 23 de enero, con su excersión 6 a 7 d después de su emisión, lo que sucedía alrededor del 30 de enero. Florecían entre el 27 y el 30 de enero, proceso que tenía una duración aproximada de 13 d. El término del llenado del grano ocurría alrededor del 13 de marzo (Sotomayor, 1954).

A partir de 1960, producto del trabajo de la Estación Experimental Centro-Sur del Ministerio de Agricultura, se lanzaron al mercado las primeras variedades de arroz producidas en el país: ´Rendifén`, ´Precofén`, ´Mapufén`, ´Gavilla` y ´Llanera II`. Estas nuevas variedades fueron producto de la selección individual de plantas desde la ´semilla nacional`, lo que hizo posible uniformar el tipo de grano, madurez de la planta y acortar el periodo de siembra a cosecha. Así se pudo escapar del período de lluvias, y mejorar la sanidad y la calidad del grano cosechado para la industria (Sims, 1983).

El proceso de desarrollo de nuevas variedades continuó. En el año 1964 se lanzó al mercado la variedad ´Oro`, producto del trabajo conjunto de la Estación Experimental Huencuecho y de la Estación Experimental Centro-Sur del Ministerio de Agricultura (Alvarado y Hernaíz, 2014). La variedad ´Oro` empezó rápidamente a reemplazar a las primeras variedades desarrolladas en el país hasta fines de los años 1970, donde empezó a competir con la nueva generación de variedades largo ancho producidas por el INIA. A partir de esa fecha, la variedad ´Oro` empezó a perder el protagonismo alcanzado.

En ese período, el uso de fertilizantes en el cultivo del arroz era bastante reducido. Los más empleados eran el salitre sódico o potásico, el guano rojo y la cal (Villalobos, 1941). Para incentivar el uso de fertilizantes, se empezaron a realizar siembras demostrativas en diferentes localidades (Lo Valdivia, Río Claro, Maule, Yerbas Buenas, Villa Alegre, y Linares) y demostrar el efecto benéfico de diferentes estrategias de aplicaciones de fertilizantes (Villalobos, 1941; Sotomayor, 1954; Valenzuela, 1956). Por otro lado, se empezaron a realizar las primeras experiencias del uso de herbicidas, como el MCPA (Sotomayor, 1954; Elgeta, 1955).

Durante las décadas de 1940 y 1950, las recomendaciones técnicas para el cultivo se podrían resumir en los siguientes puntos:

La preparación de suelo se recomendaba comenzar con el barbecho ´costino` o ´de rulo` que consistía en preparar el suelo en verano, y que continuaba con rastrajes en primavera, para dejar el suelo listo para la siembra (Sotomayor, 1954; Corporación de Ventas de Salitre y Yodo de Chile, 1955; Anónimo, 1959). La construcción de los pretiles se podía realizar en forma manual o con máquinas, siguiendo las curvas de nivel con una diferencia de cota de 8 a 12 cm. Tenían entre 40 a 50 cm de altura y 70 a 80 cm de ancho en la base inferior y de 25 cm en la parte superior, para permitir el tráfico de las personas y mantener una altura de agua constante que podía variar entre 20 a 25 cm (Villalobos, 1941).

A principios de la década de 1940 el método preferido de siembra era el almácigo y trasplante, el que fue perdiendo su importancia, hasta llegar sólo a un 10 a 12 % de la superficie sembrada a principios de la década de 1950 (Villalobos, 1941).

En el sistema de trasplante se utilizaban plantas de 25 cm, aproximadamente, las que se trasplantaban a una distancia de 20 a 40 cm, la segunda quincena de noviembre, para evitar el período de lluvias a la cosecha. Una vez terminada esta labor, se subía levemente el nivel del agua para favorecer el enraizamiento y el crecimiento de las plántulas (Garcés, 1945). El sistema de trasplante tenía varias ventajas sobre el método al voleo: 1) menor uso de semillas (40 kg ha^{-1}); 2) mayor tiempo disponible para efectuar la preparación de suelo; 3) menor presencia de malezas y lamas; 4) mayor resistencia de la planta a la tendedura; y 5) mayor rendimiento. Las principales desventajas eran su mayor costo, mano de obra escasa y cara, competencia con otros cultivos y trabajo lento, ya que un trabajador demoraba entre 15 a 20 d en trasplantar una cuadra (1,5 ha) (Villalobos, 1941; Garcés, 1945).

A finales de la década de 1950, el sistema de siembra más utilizado era la ´siembra directa de asiento` o ´al voleo`. Este sistema permitía utilizar tres alternativas: siembra al voleo sobre terreno húmedo; sobre barro claro; o suelo inundado. Dentro de estas alternativas, la siembra directa era la más usada (Villalobos, 1941). En este sistema se recomendaba dar un riego abundante y pasar una rastra especial para formar un barro espeso (Corporación de Ventas de Salitre y Yodo de Chile, 1955) y la siembra se realizaba durante octubre y noviembre (Villalobos, 1941; Sotomayor, 1954; Corporación de Ventas de Salitre y Yodo de Chile, 1955). La dosis de semilla utilizada era variable, se comenzó a sembrar utilizando 40 a 50 kg ha^{-1}, hasta llegar entre 100 y 180 kg ha^{-1} (Villalobos, 1941; Sotomayor, 1954). Previo a la siembra, se debía remojar la semilla en la noche anterior, para facilitar la germinación y aumento de peso, lo que favorecía su adherencia al suelo (Villalobos, 1941; Sotomayor, 1954).

La variedad más usada era la ´semilla nacional` (Villalobos, 1941; Theune, 1941) y algunas variedades introducidas al país. La aplicación de fertilizantes no era una práctica generalizada, a pesar que los suelos tenían un bajo contenido de nutrientes y materia orgánica, debido al uso continuo del suelo y a la ausencia de rotaciones. A principios de 1940, se recomendaba aplicar salitre sódico o potásico, en dosis de alrededor de 45 kg N ha^{-1}, como salitre sódico, 600 kg de guano rojo ha^{-1} y 1.200 kg de cal ha^{-1} (Villalobos, 1941). Posteriormente, a principios de 1950, se comienza a recomendar la aplicación parcializada de nitrógeno, a la siembra, y a

la macolla-emisión de la panoja aplicadas al voleo, retirando previamente el agua del suelo y manteniendo el suelo sin agua por dos o tres d. Como los suelos eran deficientes en fósforo, la dosis recomendada variaba entre 200 y 300 kg ha^{-1}, utilizando como fuente de fósforo al Fosfato Pelícano. Ese fertilizante se debía incorporar al suelo previo a la siembra, antes de la última labor de preparación del suelo. En casos de deficiencia de potasio, se recomendaba aplicar cloruro de potasio, sulfato de potasio o cenizas. Si el pH del suelo era bajo, se recomendaba aplicar cal (Corporación de Ventas de Salitre y Yodo de Chile, 1955).

Durante el riego, se debía mantener un caudal y una velocidad reducida de la entrada del agua a los cuadros, para que ésta adquiriera una mayor temperatura, o bien pasar el agua por potreros calentadores, debido a que el agua fría producía daños en la emergencia de las plantas y alargaba el período vegetativo, por lo que atrasaba la cosecha y aumentaba la producción de granos verdes. El riego se realizaba utilizando el sistema inter-comunicante, es decir, el agua de la acequia principal ingresaba a los cuadros superiores directamente, cubriendo los cuadros con una lámina de agua de 5 cm, para hacerla pasar a las bocas de los cuadros siguientes. Cuando las plántulas tenían la segunda hoja, se aumentaba la altura del agua, hasta alcanzar 18 a 20 cm, siempre que la temperatura fuera la adecuada. El riego se mantenía hasta el momento en que el arroz empezaba a macollar, período en el cual se quitaba por espacio de 5 d, para realizar el control de malezas, fortalecer el desarrollo del sistema radicular de la planta y realizar la segunda aplicación de nitrógeno. Pasado ese período, se subía el nivel del agua a una altura de 20 a 25 cm. Cuando un 80 % del arroz estaba maduro, se cortaba el agua. El gasto de agua en el cultivo variaba entre 1 y 3 L seg^{-1} ha^{-1} (Villalobos, 1941).

El control de malezas se realizaba normalmente a mano, por cuadrillas de obreros, que entraban a los cuadros arrancando todas las plantas extrañas y depositándolas en los pretiles o sacándolas fuera del campo. El número de controles de malezas era variable y dependía del grado de infestación del cultivo (Garcés, 1945; Sotomayor, 1954). Las principales malezas eran el hualcacho, el arroz rojo, la chépica, la ´placa`, maleza que se desarrolla en las entradas de agua y posteriormente invadía el cultivo. Otras malezas de menor importancia eran la hualtata, totora y estoquillo, además de otros problemas como la lama y los pájaros (Garcés, 1945; Rodríguez, 1951). El control del hualcacho se realizaba cortando la planta para evitar su fructificación y el de la lama, mediante ´secas`, por tres a cuatro d, para permitir que el sol seque a la lama y no dañe el cultivo (Garcés, 1945). Los resultados de la aplicación de herbicidas indicaban que ésta había sido errática, ya que en algunos casos había controlado la hualtata y en otros casos se había presentado un daño a la planta de arroz (Rodríguez, 1951).

Un criterio para iniciar la cosecha del arroz era la inclinación de la panoja sobre su raquis, por el efecto de su peso. La cosecha se podía realizar a mano o máquina, siendo la cosecha a mano la más común. Otro índice para iniciar la cosecha era que los granos de la parte superior de la panoja tuvieran una consistencia pastosa. En ese momento, los granos de la parte superior de la panoja estarían completamente desarrollados, maduros, exentos de puntos yesosos y opacos, y tendrían una buena calidad industrial. En ese estado de desarrollo, el grano podía tener entre 23 y 28 % de humedad, la que se reducirá posterior a la cosecha (Villalobos, 1941). Se consideraba como grano verde aquel que tuviera más de 30 % de humedad, y maduro aquel que tuviera entre 16 y 20 %. El porcentaje de humedad recomendado para iniciar la cosecha podía variar entre un 23 y un 28 % (Villalobos, 1941). Como norma general, se empezaba a ´segar o cortar` las plantas de arroz, cuando los dos tercios del grano estaban secos y la paja había perdido su color verde. La siega se efectuaba cortando las plantas a 15 cm del suelo, con la hoz formando gavillas cada cuadra más o menos, con un diámetro de 50 a 60 cm, las que se amarraban con los mismos tallos o con totora y se dejaban al borde del pretil, para favorecer un rápido secado y posteriormente llevarlas en carreta al lugar de la trilla (Villalobos, 1941). Cuando el suelo no estaba seco, se usaban ´carrunchos` o carretas sin ruedas arrastradas por caballos hasta las carretas que llevan las gavillas a la era o lugar de la trilla (Villalobos, 1941; Garcés, 1945).

El sistema más común de trilla era mecanizado, donde se utilizaban las trilladoras estacionarias del trigo, con algunas modificaciones. Se recomendaba trillar el grano lo antes posible (dos d), después de cortado para evitar la lluvia posterior a la cosecha y la pérdida de la calidad del grano, considerando que los molinos requerían hasta un 16 % de humedad (Villalobos, 1941).

Durante ese período se planteaba también la necesidad de incorporar algunas innovaciones al cultivo del arroz, con el fin de mejorar su productividad, por ejemplo, el uso de la automotriz provista de orugas que había dado excelentes resultados en Brasil y Argentina (Corporación de Ventas de Yodo y Salitre de Chile, 1955), aunque ya se había realizado alguna experiencia en la provincia de Santiago (Gomien, 1951). También se evaluaba un nuevo tratamiento de elaboración del arroz bajo presión, conocido como ´malekinazo`, que retenía un alto porcentaje de aminoácidos, 65 % de tiamina, 85 % de niacina y 90 % de ácido pantoténico (Bangert, 1953). Asimismo, se evaluaba la incorporación de praderas en el sistema de producción de arroz, por ejemplo, la siembra de trébol encarnado para mejorar la producción de forraje que se obtienen normalmente de los rastrojos de arroz (Williams, 1957) y el uso de la siembra por avión (Anríquez y Zepada, 1962).

Industria arrocera

En Chile, la primera industria molinera inició sus actividades en el año 1936, cuando la producción promedio anual de arroz alcanzaba 3.500 t (Astorga, 1944; Olate, 1950). Sin embargo, cinco años más tarde, en 1941 (Cuadro 3), ya funcionaban 13 industrias arroceras (Astorga, 1944). Para el año 1950 había 16 industrias registradas desde la provincia de Santiago a Ñuble (Olate, 1950; Torrealba, 1956) y hacia finales de 1960 la industria arrocera nacional tenía una capacidad instalada para procesar 200.000 toneladas (Sims, 1969).

Cuadro 3. Propietario, nombre de la industria y ubicación de las 13 primeras industrias arroceras instaladas en el país al año 1941.

Propietario	Nombre de la industria	Localidad
Rubio Santendor y Cia. Ltda.	Molino de arroz	Quillota
Piazza y Bertucci Ltda.	Molino Arrocera Jotabé	Valparaíso
Magnaal y Boccatagliata Ltda.	Molino de Arroz EGA	Santiago
Williamson B.	Compañía Molinera San Cristóbal	Santiago
Del Favero y Uriarte.	Molino de Arroz Requena	Santiago
Orsini y Cía.	Molino de Arroz	Santiago
Comunidad Correa Montt	Molino de Arroz	Lo Espejo
Sociedad Arrocera de Colchagua	Molino de Arroz Socol	Colchagua
Ginester, Roca y Cía.	Molino de arroz Serrija	San Fernando
Arrigorriaga Hermanos	Molino de Arroz Volcán	Curicó
Juan Bertucci e hijos	Molino de Arroz Jotabé	Talca
A. Errazuría de Sánchez	Molino de Arroz	Palmilla, Linares
Raúl Simón	Molino de Arroz	San Carlos

Fuente: Astorga, 1944.

Otras industrias pioneras en el procesamiento de arroz fueron: Tresmontes, que en 1930 comenzó a trabajar en arroz y otros productos, tales como vino y aceite. En 1944, la empresa Tresmontes se divide en tres sociedades, donde ´Ibáñez y compañía` se queda con la distribución del arroz, el vino y el aceite (Empresa Carozzi, 2020); el Molino de Arroz Miraflores, ubicado en Lo Espejo, Santiago, construido en el año 1941, que se transformó en la Compañía Arrocera Miraflores S.A. en 1948 y, posteriormente, en Compañía Arrocera e Industrial Miraflores. Luego, esta empresa instaló un molino en Talca, el que fue comprado por la Compañía Molinera San Cristóbal, la que después de algunos años pasó a ser propiedad de la empresa Carozzi (Alvarado y Hernaíz, 2014); Empresa Tucapel S.A, constituida el 7 de febrero de 1945 y autorizado su funcionamiento mediante el Decreto Supremo 1724 del 19 de marzo de 1945 (Tucapel, 1963); y Arrocera Zaror, fundada en 1947 en la ciudad de Molina, que en 1948 se trasladó a Talca (Alvarado y Hernaíz, 2014).

En aquella época, el arroz se transportaba desde los campos hacia los molinos por medio de camiones y desde el molino a los puntos de consumo y puertos de embarque principalmente por ferrocarril (Torrealba, 1956). Parte de los recursos económicos que los agricultores utilizan para financiar las labores del cultivo del arroz eran proporcionados por la industria, a través de crédito directo y/o semillas (Olate, 1950).

La industria arrocera se caracterizaba por estar ubicada cerca de estaciones de ferrocarriles, para contar con desvíos propios de los trenes hacia sus plantas, lo que le significaba un ahorro en fletes y ventajas en la elaboración del producto. Además, poseían maquinaria de procedencia inglesa, alemana o brasileña; tenían una alta capacidad instalada en relación al producto elaborado (la producción de arroz con cáscara era insuficiente para usar la totalidad de la capacidad de la industria); las faenas de trabajo se iniciaban en marzo y finalizaban en noviembre y durante los meses de diciembre a febrero, el personal operario se destinaba a limpiar y reparar la maquinarias y los edificios; el proceso industrial presentaba deficiencias en la elaboración del arroz, debido a la mala calidad del producto que cosechaban los agricultores, granos poco uniformes y un alto contenido de humedad, lo que significaba pérdidas por granos partidos y verdes (Torrealba, 1956).

Elaboración del arroz

Los productos y subproductos obtenidos en la elaboración del arroz estaban íntimamente relacionados con la variedad de arroz, condiciones de conservación de grano paddy, estado de madurez y humedad de grano en el momento de cosecha, maquinaria y manejo del arroz durante almacenaje y su elaboración. Por tal motivo, todos los molinos arroceros tenían un rendimiento diferente. Por lo general, las variedades de granos delgados obtenían un menor rendimiento comparado con las variedades de granos más gruesos (Villalobos, 1941).

En el país, no existía una reglamentación oficial para la comercialización del arroz, ni métodos oficiales de análisis (Astorga, 1944). Sin embargo, la industria realizaba algunos análisis para evaluar la calidad del grano entregado por los agricultores. Este análisis incluía los siguientes componentes: humedad del grano (16 %), impurezas, granos rojos, verdes, fallos y rendimiento comercial, granos enteros y partidos (Villalobos, 1941).

Durante ese período se estimaba que el ´rendimiento comercial` del arroz paddy era de alrededor de 60 a 62 %, que incluía granos enteros y partidos; donde el 40 % era grano entero, 10 % de media grana, 11 % de puntas de primera y 4 % de puntas de segunda. Por otro lado, los principales subproductos eran el afrechillo (11 %), impurezas (2 %) y cáscara (22 %). Los granos enteros y pulidos se conocían con el nombre de ´arroz flor` o ´súper fino` (Villalobos, 1941). Un análisis realizado en la industria EGA en el año 1943, arrojó un ´rendimiento comercial de un 62 %`, que incluía un 37 % de grano entero, un 19 % de medianas y un 6 % de puntas. Entre los

subproductos se contabilizaron cuatro categorías de granza y dos de hualcacho, impurezas y cáscara (Villalobos, 1941).

Las posibles causas del bajo rendimiento industrial (37 a 40 % de grano entero) se podían asociar al: a) uso de variedades que genéticamente poseían un bajo rendimiento industrial, como era el caso de la llamada ´semilla nacional` que era una mezcla de variedades; b) alto contenido de humedad del grano a cosecha; c) tratamiento inadecuado del arroz durante la cosecha. El segado y engavillado permanecía en el campo por varios días; d) sistemas de almacenaje poscosecha ineficientes; e) problemas en el proceso de elaboración por la mala calidad del producto recibido; f) falta de valorización económica y comercial del concepto de calidad del grano, por parte de los consumidores y la industria, debido a la ausencia de normas oficiales de calidad del producto comercializado (Brevis, 1963).

A pesar de esta situación, en la década ocurrieron dos hechos muy significativos en el desarrollo del arroz en el país, como fueron el desarrollo y la liberación de nuevas variedades al mercado y el inicio de estudios tendiente a definir conceptos de calidad, condiciones adecuadas de cosecha y almacenaje del grano, y un sistema de posibles bonificaciones y castigos por cumplimiento o no, de ciertos parámetros de calidad (Brevis, 1963), todo lo cual dio origen, posteriormente, a la Norma Chilena de Calidad del arroz.

Comercialización del arroz

El comercio del arroz estaba regulado por el Estado, donde el precio y las normas de comercialización eran establecidas por diferentes instituciones. Es así como, el Instituto de Economía Agrícola informaba, con cierta anterioridad a la cosecha, los precios del arroz a nivel de agricultor, previo al estudio de los costos de producción realizado por la misma institución. Posteriormente, el Ministerio de Economía y Comercio fijaba los precios de los productos a nivel general, y el Comisariato General de Subsistencias fijaba y controlaba los precios del producto a nivel del comercio detallista y venta al público (Olate, 1950). La demanda del público se dividía en un 15 % de arroz extra, 45 % de arroz superior y 40 % de arroz de primera. La producción nacional en el país era, aproximadamente, de 25.000 t de arroz elaborado, la cual se obtenía de una cosecha de 40.000 t de arroz paddy (Villalobos, 1941).

Los representantes de la industria molinera de arroz estaban organizados en una corporación con personería jurídica denominada ´Asociación de Molineros de Arroz`. Los miembros de esta corporación podían ser personas naturales o jurídicas, propietarias o arrendatarias de molinos que se hayan inscrito en el acta de constitución de la Asociación, o que posteriormente se hayan adherido a ella (Torrealba, 1956), debiendo ser aceptadas por el Directorio (Olate, 1950).

Finalmente, los agricultores estaban organizados en varias asociaciones de productores de arroz, por ejemplo, en la provincia de Colchagua como la Sociedad de Arroceros de Colchagua (SACOL)**;** en Talca, la Asociación de Productores de Arroz de Talca; y en San Carlos, el Comité de Agricultores Arroceros y la Cooperativa de Productores de Arroz de San Carlos, entre otras (Elgueta, 1955; Olate, 1959). Uno de los objetivos principales de estas organizaciones era incidir, principalmente, en la fijación de precios del arroz (Olate, 1959) y en algunos casos apoyar la adopción de tecnologías (Villalobos, 1941; Elgueta, 1955).

A pesar de los avances obtenidos en el cultivo durante este período, se presentan varios desafíos que se pueden resumir en los siguientes puntos:

Desafíos tecnológicos asociados a la producción del arroz

1. Desarrollo de nuevas variedades: ausencia de variedades adaptadas a factores climáticos adversos, especialmente bajas temperaturas y precoces para evitar el daño por las lluvias a cosecha.

2. Preparación del suelo y siembra: deficiente nivelación y construcción de pretiles, sin curvas de nivel, y presencia de un sistema de siembra de almácigo y trasplante de alto costo y escasa mecanización.
3. Control de malezas: deficiente control de malezas de gramíneas como el hualcacho, (*E. crus-galli*).
4. Manejo del agua: uso de aguas frías que causa pérdida de plantas en los primeros cuarteles, los que se llenan de lama, con pérdida importante de plantas.
5. Cosecha: problemas a cosecha, manejo de gavillas en la era y largo tiempo de secado que influye en la calidad posterior del grano.
6. Escasa mecanización en las labores del cultivo.

Desafíos institucionales y aquellos relacionados con infraestructura y apoyo gubernamental

1. Investigación: necesidad de contar con una Estación Experimental Genética Arrocera para el desarrollo de nuevas variedades, estudios agronómicos, manejo industrial y calidad del grano.
2. Reglamentación: ausencia de una reglamentación oficial sobre la comercialización, tipificación y estandarización del arroz en bruto, elaborado y subproductos.
3. Infraestructura: falta de seleccionadores de semilla de propiedad de los agricultores o del Estado, venta de semilla a un precio razonable y necesidad de contar con un mayor número de secadores, bodegas, plantas seleccionadoras y mejoramiento del material ferroviario que transporta el arroz.
4. Apoyo gubernamental: protección y fomento del Estado para el desarrollo de este cultivo.

Desarrollo institucional y educacional agrícola

En el año 1948, el Departamento de Genética y Fitotecnia del Ministerio de Agricultura dio origen al Departamento de Investigaciones Agrícolas (DIA) que llegó a contar con 19 estaciones experimentales distribuidas desde la ciudad de Vallenar por el norte, hasta la ciudad de Osorno por el sur. En 1953, se crea el Consejo de Fomento e Investigaciones Agrícolas (CONFIN), mediante DFL N°185, al que se traspasaron los campos experimentales. En 1955 se establece la Oficina de Estudios Especiales en el Ministerio de Agricultura, con el apoyo técnico y financiero de la Fundación Rockefeller, que da un mayor impulso a la investigación agrícola y contribuye a la preparación del personal profesional a través de becas para estudios de postgrado en el extranjero. En 1959 se lleva a cabo el proyecto de Estaciones Experimentales que dio origen a la estación experimental central en el fundo La Platina, actual Centro Regional de Investigación INIA La Platina, ubicado en la región Metropolitana; a la Estación Experimental del Sur, actual Centro Regional de Investigación INIA Carillanca, ubicado en Temuco, región de la Araucanía, y a la Estación Experimental Centro-sur, actual Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu, ubicado en Chillán, región de Ñuble (INIA, 2014). En 1962, la ley N° 15.020 transformó el CONFIN en el Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP, cuyo mandato fue establecido por la Ley Orgánica 18.910, modificada por la Ley 19.213 en mayo de 1993, institución encargada de la asistencia técnica y crediticia a los pequeños agricultores (www.indap.cl). En 1964, se creó el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, persona jurídica de derecho privado, con participación del Estado y las Universidades (INIA, 2014).

Universidades

En 1954 se conforma la Facultad de Agronomía y Ganadería de la Universidad de Concepción (www.agronomiaudec.cl).

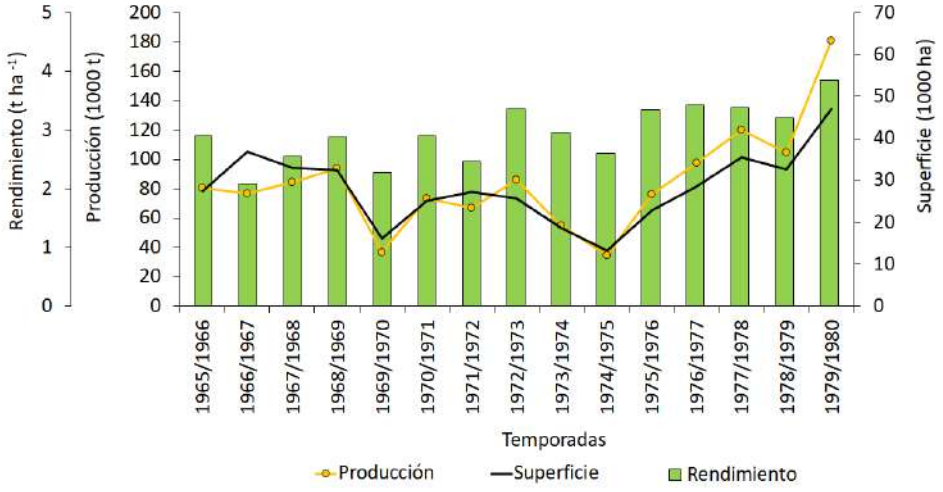
III. Período 1964-2020

Para facilitar el análisis de estos 56 años, el período se subdividió en tres etapas, la primera comprendida entre 1964 y 1979, el segundo período desde el año 1979 al año 1998 y el tercer período desde 1999 al año 2020.

Etapa 1964-1979

Superficie, producción y rendimiento del arroz

Durante esta etapa, la superficie sembrada con arroz fue bastante variable y fluctuó entre 13.170 a 47.070 ha, la producción desde las 34.351 a 181.174 t y el rendimiento desde 2,1 a 3,9 t ha^{-1} (Figura 13). El rendimiento se mantuvo bajo las 3 t ha^{-1} entre 1964 y 1974, a partir del cual se observa una leve tendencia a la obtención de mayores rendimientos.

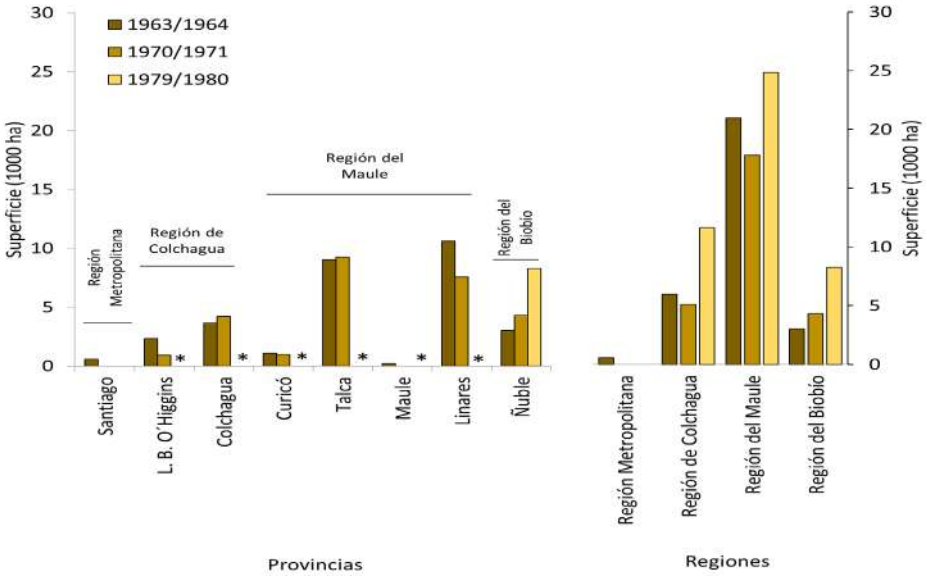


Fuente: INE, ODEPA, 1979; 1980.

Figura 13. Superficie (1.000 ha), producción (1.000 t) y rendimiento (t ha^{-1}) de arroz entre los años 1964 y 1979.

Distribución regional y provincial de la superficie, producción y rendimiento de arroz

En la temporada 1963 y 1964, la superficie de siembra del arroz se extendió desde la provincia de Santiago, Región Metropolitana, hasta la provincia de Ñuble (Chillán), Región de Ñuble (ex Biobío), con una mayor concentración en la provincia de Talca, Región del Maule. En este período continuó la tendencia del desplazamiento de la superficie de siembra de arroz hacia el sur, que se había observado desde los inicios del cultivo del arroz. Es así como la superficie de siembra ubicada en Santiago, desapareció a partir de 1970. El límite norte de la producción de arroz se ubicó en la Región de Libertador Bernardo O'Higgins, con una mayor concentración de la superficie sembrada en la región del Maule (Figura 14).

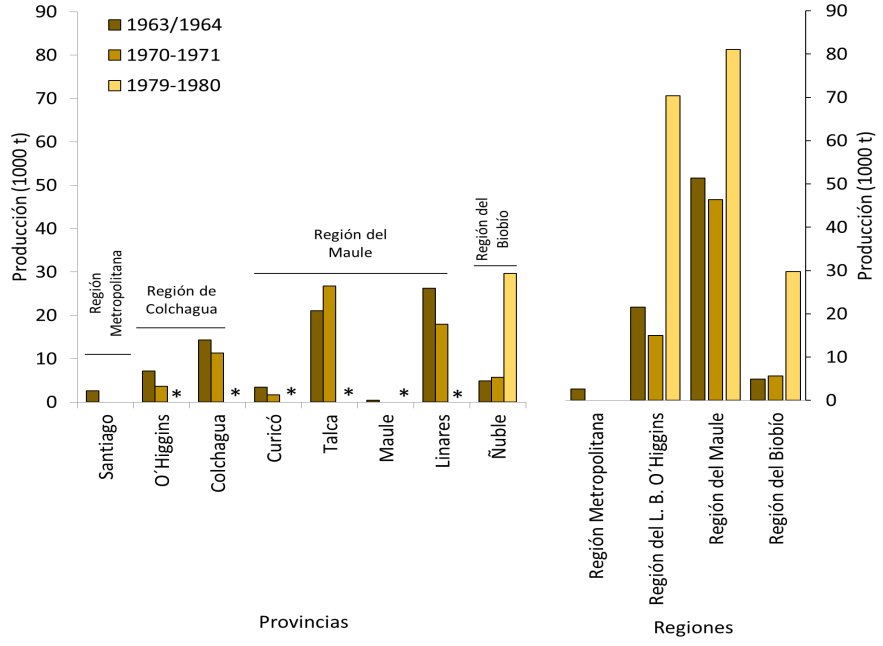


Fuente: ODEPA, 1976; 1988.

*No existe un detalle de la superficie provincial para ese año, comienza la información a nivel regional.

Figura 14. Superficie sembrada (1.000 ha) de arroz por provincias y regiones, en las temporadas 1963 -1964, 1970-1971 y 1979-1980.

La producción regional de arroz siguió la misma tendencia de la superficie sembrada, lográndose una mayor producción en la región del Maule, seguida de Colchagua y finalmente Ñuble, obteniendo la máxima producción en la temporada 1979 -1980 de 181.174 t (Figura 15).

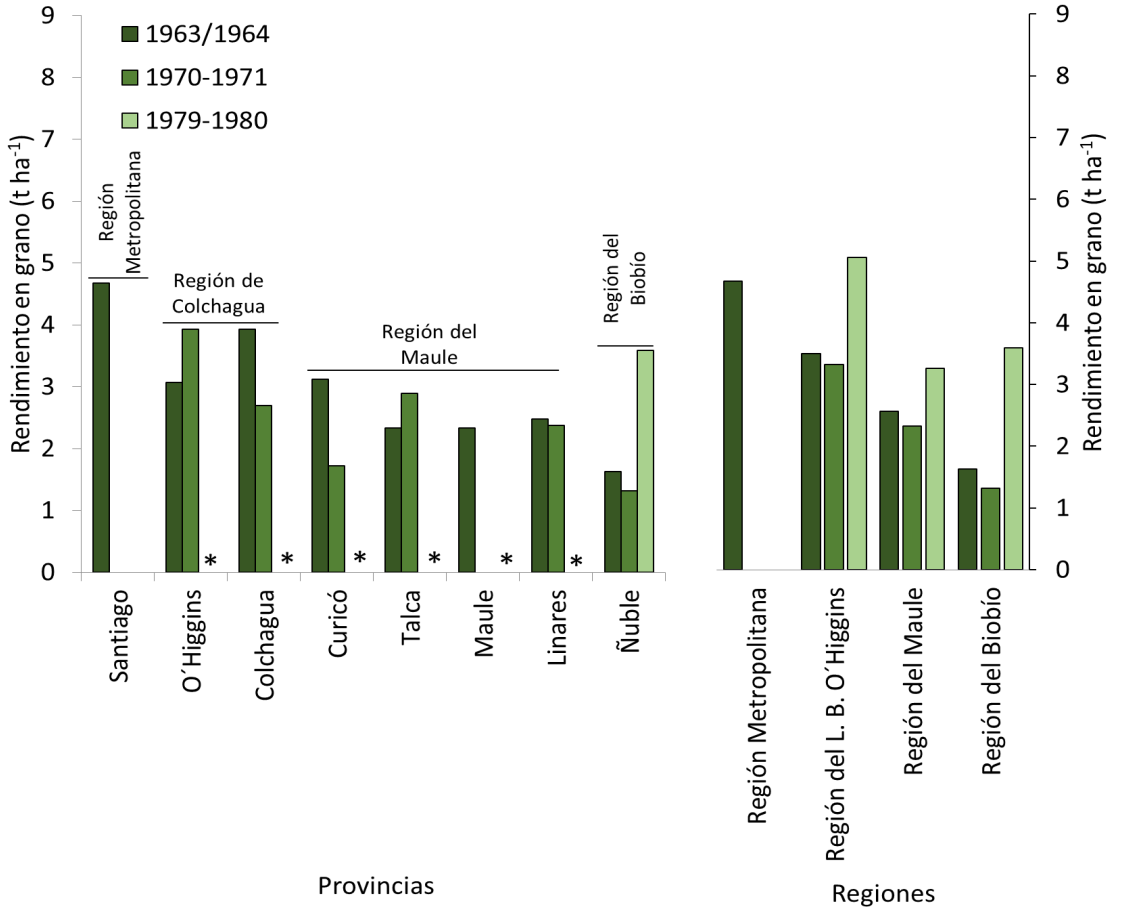


Fuente: ODEPA, 1976; 1988.

*No existe un detalle de la superficie provincial para ese año, comienza la información a nivel regional.

Figura 15. Producción (1.000 t) de arroz por provincias y regiones, en las temporadas 1963-1964, 1970-1971 y 1979-1980.

El rendimiento fue bastante bajo y variable entre las regiones. A pesar de esta situación, el rendimiento promedio nacional aumentó en relación con la última temporada. Si se compara el primer y el último período, es posible advertir que las tres regiones aumentaron su rendimiento, siendo mayor en la región de O´Higgins y en la del Biobío (Figura 16).



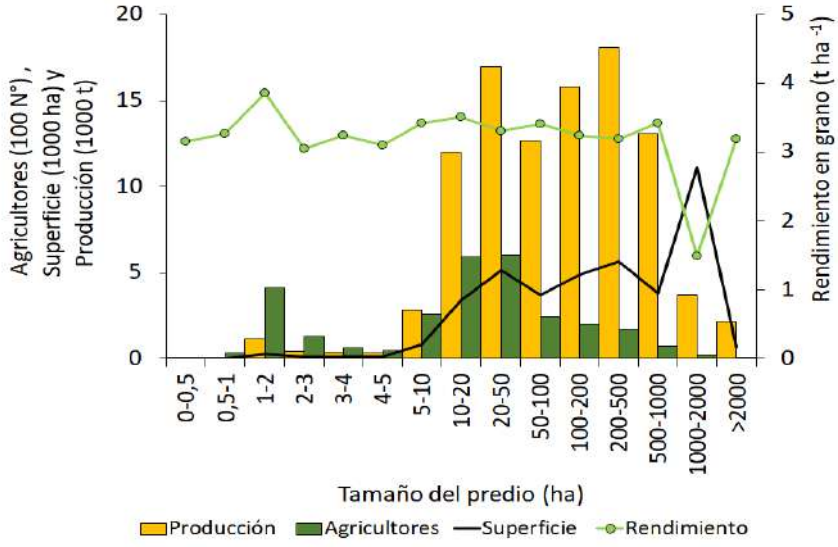
Fuente: ODEPA, 1976; 1988.

*No existe un detalle de la superficie provincial para ese año, comienza la información a nivel regional.

Figura 16. Rendimiento (t ha^{-1}) por provincias y regiones, en las temporadas 1963-1964, 1970-1971 y 1979-1980.

Distribución del número de predios agrícolas con arroz

De acuerdo al Censo del año 1955, existían 2.853 predios agrícolas con arroz, de diferentes tamaños, que se dedicaban a la producción de arroz. El 74,9 % (2.137 predios) eran menores a 50 ha, las que ocupaban una superficie de 10.059 ha, con una producción de 3.424 t y un rendimiento promedio de 3,3 t ha^{-1} (Figura 15). Por otro lado, un 2,6 % (74 predios) poseían entre 500 y 2.000 ha que representaban una superficie 14.974 ha, una producción de 16.823 t y un rendimiento de sólo 2,4 t ha^{-1}. Finalmente, existía también un 0,3 % (seis predios) con más de 2.000 ha (Figura 17).



Fuente: INE, 1976.

Figura 17. Agricultores (N°), superficie (1.000 ha), producción (1.000 t) y rendimiento (t ha^{-1}), por tamaño del predio (ha) en el año 1975.

Para el año 1980, el Plan de Desarrollo Agropecuario estableció como meta un promedio nacional de 4,0 t ha^{-1}, lo que significaba un aumento de casi un 20 % en relación al año 1970, por lo cual era importante mejorar las condiciones agronómicas del cultivo (Sims y Alvarado, 1972).

Parte de los problemas que enfrentó el cultivo del arroz en ese período fue el clima. En primer lugar, la presencia de bajas temperaturas afectó el desarrollo de la planta en los estados de germinación, floración y madurez; en segundo lugar, la presencia de humedad (rocío) al momento de la cosecha, la arquitectura de la planta (altura, hojas largas y anchas y caña débil) facilitó la tendedura; y en tercer lugar la presencia de lluvias durante el período de madurez de la planta y cosecha dificultaron las labores y redujeron la calidad del grano, aumentando el manchado y la humedad, que en casos extremos pudo significar el rechazo de la compra y/o un menor precio. La siembra temprana era, a veces, la forma de obtener un mayor rendimiento y reducir los riesgos climáticos (Sims y Alvarado, 1972).

Otro factor limitante en la producción del arroz, era la falta de nivelación de los suelos, la que determinaba la confección de una gran cantidad de pretiles, disminuyendo la superficie sembrada, la eficiencia del riego, el control adecuado de malezas y la incorporación de mecanización en el cultivo. Estudios realizados por INIA, estimaron que la pérdida de suelo por la confección de pretiles era de aproximadamente un 8 % de la superficie sembrada, además de una pérdida de fertilidad de la parte superficial del suelo que era removida para realizar el pretil (Sims y Alvarado, 1972). En un comienzo, los pretiles se construían en forma manual, de una altura de 40 a 50 cm, con un ancho de 80 a 100 cm y con cota inferiores a 10 cm, lo que fue evolucionando a la construcción de obras menores y más mecanizadas, utilizando ´discos terraceros` (Sims y Alvarado, 1972).

El manejo del agua, era otro factor importante en el cultivo del arroz, donde existía una serie de factores relacionados con la eficiencia del uso del agua, (desnivel de los suelos, exceso de pretiles y la falta de drenajes), que hacía muy complejo el manejo uniforme del agua previo a la siembra. Además de estos factores, era importante tener en consideración los factores que afectaban el manejo del agua en el cultivo, como el sistema de riego, caudales, temperatura del agua, y la entrega del agua a los agricultores.

Estudios realizados en Chillán indicaron que la inundación permanente de las plantas favorecía la obtención de un mayor rendimiento en comparación a una frecuencia de riego de siete y 15 d (Sims y Alvarado, 1972). En relación a la cantidad de agua utilizada durante el cultivo, se puede estimar un valor cercano a los 18.000 m^3 ha^{-1}, de los cuales 1.000 a 1.200 m^3 ha^{-1} se utilizaban en el llenado inicial de los cuadros.

La temperatura del agua en el arroz era otro factor importante a tener en consideración por el posible efecto negativo en el desarrollo de la planta. Las mediciones realizadas indicaron que la mayor temperatura del agua se obtenía en diciembre, alrededor de las 18 horas y en la salida del agua, mientras que las temperaturas más bajas se observaban en las mañanas, en la zona de la entrada del agua, y en los meses de octubre y noviembre. Esta información indicó también que los cambios de temperatura del agua estuvieron más asociados a la radiación solar que a la temperatura del aire.

En relación a la disponibilidad del recurso hídrico se observó una mayor abundancia de agua en primavera, la que fue disminuyendo a partir de diciembre, haciéndose crítica en los meses de enero y febrero. Finalmente, la fecha de inicio de la entrega del agua por los ríos y embalses, ocurría alrededor de los primeros días de octubre, situación que impedía, en algunos casos, sembrar temprano (Sims y Alvarado, 1972).

La preparación de suelo era también una labor bastante compleja y se realizaba, principalmente, con animales (caballos). Este trabajo, por lo general, incluía aradura, cruza (aradura cruzada), rastrajes (mecánica o de clavos) y la pasada de un ´rastrón` de madera sobre el agua, para deshacer los terrones (Sims y Alvarado, 1972).

El llenado de los cuadros se realizaba a través de las ´bocas`, las que se construían en forma alternada en el pretil, para permitir la circulación del agua y evitar el crecimiento de algas (´lama`). El llenado de los cuadros también permitía observar la nivelación del suelo. En algunos casos, el emparejamiento del suelo se realizaba con pala o con la confección de un nuevo pretil si era necesario (Sims y Alvarado, 1972).

La siembra del arroz se empezaba a realizar a fines de septiembre y podía terminar en noviembre, dependiendo de las condiciones climáticas, disponibilidad de agua y otros factores. El sistema de siembra más utilizado era el manual y al voleo, aunque todavía existía un pequeño porcentaje de agricultores que utilizaba el almácigo-trasplante. En el sistema de siembra al voleo, la semilla se remojaba en los canales o pozas, para acelerar el proceso de germinación y facilitar una mayor adherencia del grano al suelo debido a su mayor peso. La cantidad de semilla a remojar debía estar de acuerdo con la capacidad de siembra diaria. El transporte de la semilla remojada se realizaba en caballos hacia los sembradores, los que utilizaban las ´mantas sembradoras` para colocar la semilla. La dosis de semilla utilizada era de unos 160 kg $ha^{-1}$. Las variedades más sembradas en este período eran ´Lonquén Amarillo`, ´Rendifén` y ´Oro`, todas las cuales tenían una mala calidad culinaria (Sims y Alvarado, 1972).

El sistema de almácigo-trasplante se caracterizaba por poseer un mayor costo que el sistema al voleo, pero presentaba algunas ventajas en el control de malezas y en el uso de una menor cantidad de semilla. Se estimaba que 55 kg de semilla podían proveer plantas para una hectárea de siembra, en comparación del uso de 160 kg ha^{-1} en el sistema tradicional. En este sistema se recomendaba utilizar plantas de siete semanas de desarrollo y plantar tres plantas por golpe y realizar 35 golpes m^{-2}. El sistema de plantación utilizado no tenía un orden preestablecido, por lo cual se le llamaba ´zumba` (Sims y Alvarado, 1972).

A principios de los años 1960, el uso de fertilizantes en la siembra de arroz era bastante limitado, ya que su efecto positivo en el rendimiento no estaba muy claro para los agricultores. Las razones de esta situación era el uso de suelos con buenos niveles de nutrientes y la presencia de variedades que no respondían a los fertilizantes, muy altas y de abundante desarrollo vegetativo. El desarrollo de nuevas variedades, de menor altura y de menor desarrollo vegetativo, permitió demostrar el efecto

positivo de los fertilizantes, primero nitrogenado, y posteriormente los fosfatados. En el caso del nitrógeno, se empezó a producir un cambio desde los nitratos (salitre) hacia los amoniacales (urea) y la parcialización de la dosis de su aplicación, una dosis a la siembra y otra a la macolla, para lo cual se debía bajar el nivel del agua y volver a llenar los cuadros después de la aplicación (Sims y Alvarado, 1972). Las malezas eran un factor crítico en el cultivo del arroz y los herbicidas más comunes para el control eran el Stam F-34, Ordram 6E y MCPA (Sims y Alvarado, 1972). El cultivo no presentaba problemas sanitarios, salvo la ´lama` y el ´luche`, que se podían controlar con sulfato de cobre o bajando el agua del arrozal (´secas`), los patos silvestres y los crustáceos. En relación a las plagas, eventualmente se presentaban langostas, chinches de campo y un lepidóptero (*Protoleucania albilinea*). También se sospechaba de la presencia de nemátodos (Sims y Alvarado, 1972).

En este contexto productivo, la liberación al mercado de la variedad ´Oro`, alrededor de 1964, constituyó un hito muy importante, ya que esta variedad poseía un nuevo tipo de planta y presentaba una mayor respuesta a la aplicación de fertilizantes y al control de malezas, lo que permitió incrementar el potencial de rendimiento en comparación a las primeras variedades desarrolladas en la década anterior.

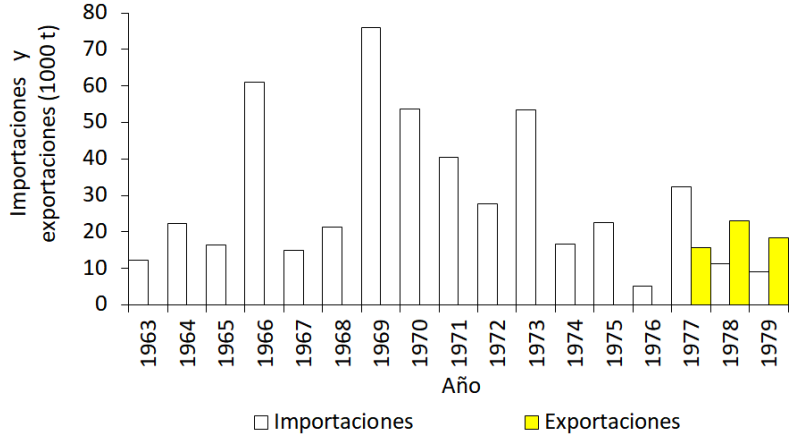
La cosecha se realizaba en forma semi-mecanizada que incluía un corte manual de las plantas (siega) y la trilla con máquina estacionaria. El agua se cortaba cuando el grano tenía entre 22 y 26 % de humedad y los granos basales estaban en estado de masa firme o dura. Sólo en algunas ocasiones se utilizaban automotrices, aunque el suelo debía ser acondicionado para permitir su trabajo (Sims y Alvarado, 1972).

En el proceso de elaboración del arroz se obtenían varios productos y subproductos: cáscara (20 %) y arroz integral (80 %), llamado ´brown rice`. La elaboración del arroz integral rendía en promedio un 10 % de afrecho y harinilla y un 70 % de arroz pulido total. Del arroz pulido total se obtenía un 45-46 % de grano entero; 20 % de grano partido, 2 % de puntas y 3 % de pérdidas en el proceso de elaboración (Sims y Alvarado, 1972).

Comercialización del arroz

Comercio internacional del arroz

Según la información disponible, el país era deficitario en la producción de arroz, por lo cual se debía importar para abastecer las necesidades de la población. Sin embargo, entre los años 1977 a 1979 se logró exportar una cantidad de arroz, debido, posiblemente, a condiciones favorables de precios (Figura 18).

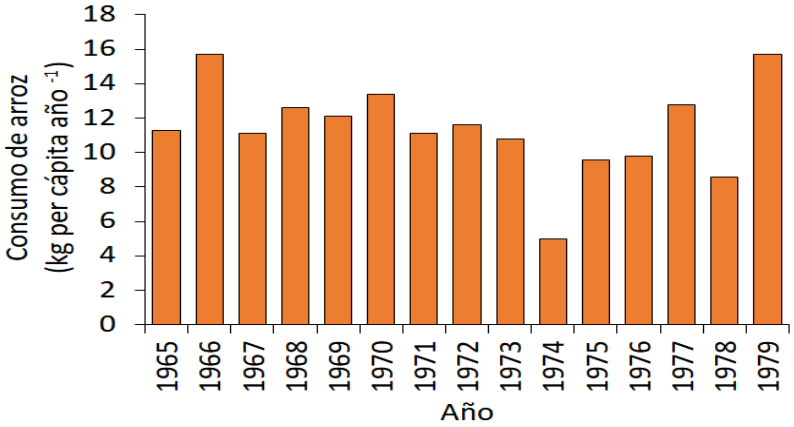


Fuente: Morales, 2002.

Figura 18. Importaciones (1.000 t) y exportaciones (1.000 t) de arroz, entre los años 1963 y 1979.

Consumo aparente

El consumo aparente per cápita de arroz en el país se mantuvo más menos constante entre el año 1965 y 1973, alcanzando entre 10 y 12 kg por persona por año. En el año 1974 se produjo una importante reducción a 5 kg hab^{-1} $año^{-1}$, retomando sus niveles históricos posteriormente, con algunas variaciones anuales (Figura 19).



Fuente: Morales, 2002.

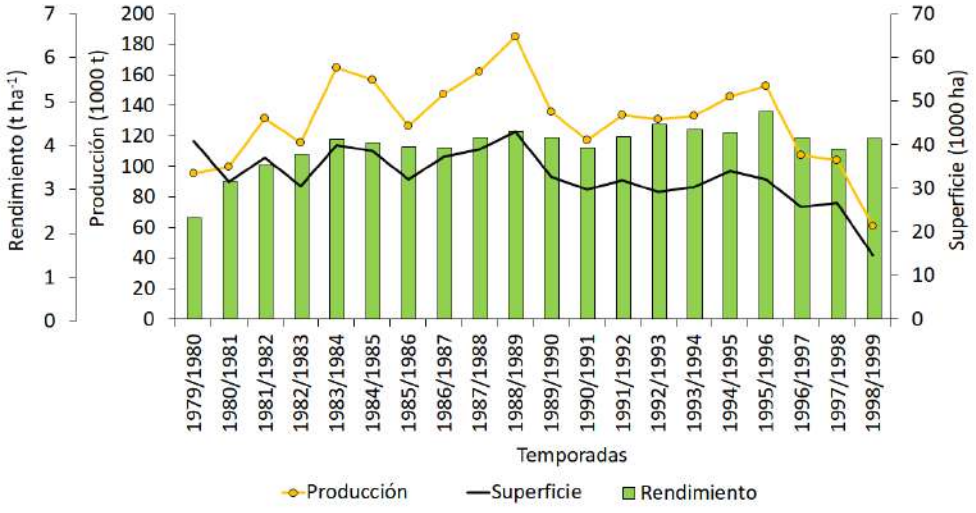
Figura 19. Consumo de arroz (kg hab^{-1} $año^{-1}$) entre los años 1965 y 1979.

Un estudio realizado por la Universidad Católica de Chile sobre el consumo de arroz en el país, determinó que el consumo per cápita de arroz no dependía fuertemente del nivel de ingreso de la población, y que al aumentar el ingreso de los consumidores en un 10 %, el aumento de consumo de arroz sólo aumentaba en un 3,3 %, lo que coincidía con el valor de la elasticidad del ingreso estimado (0,33). Por otro lado, se señalaba que la elasticidad del precio del arroz era también baja (< 1), de modo que la reducción del precio del producto tampoco producía aumentos significativos en el consumo del arroz en la población (Martínez y Muchnik, 1983). Este estudio determinó también que el consumo del arroz estaba marcado por la estacionalidad, siendo mayor entre los meses de mayo a noviembre. Por lo tanto, la mejor forma de promover su consumo era a través de nuevas formas y presentaciones del producto, de una educación enfocada a aspectos nutricionales y a desarrollar un mayor potencial exportable (Martínez y Muchnik, 1983; Aldunate, 1983; Aldunate et al.,1984).

Etapa 1979-1998

Durante esta etapa se observa un aumento importante de rendimiento promedio del cultivo, el que pasó de 2,5 a 3,0 t ha^{-1}, a valores cercanos a 4,0 t ha^{-1} (Figura 20). Este salto cuantitativo y cualitativo en la producción del cultivo del arroz se debió, principalmente, a los resultados de la adopción de mejores prácticas agronómicas, como el mayor uso de fertilizantes, control de malezas y uso de nuevas variedades con un mayor potencial de rendimiento que respondían, positivamente, a las mejores condiciones de manejo.

La superficie sembrada también sufrió un cambio importante. En los primeros años de esta etapa se observó una superficie sembrada que fluctuó entre 30 y 40 mil ha. Sin embargo, en los últimos tres años se produjo una importante reducción que llegó a alrededor de las 20 mil ha (Figura 20).

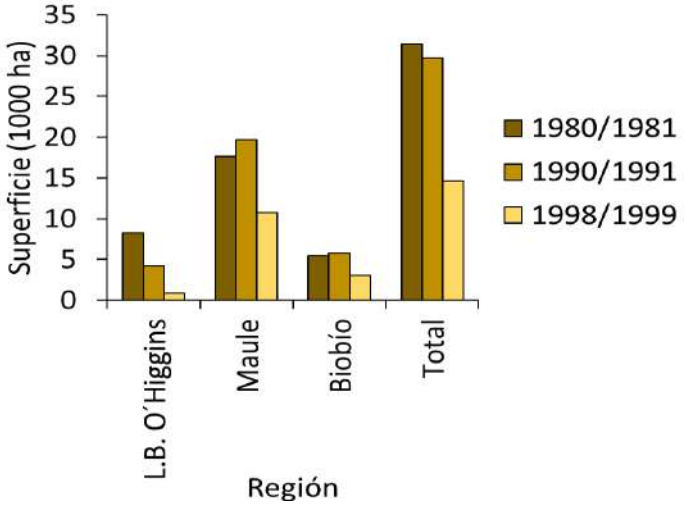


Fuente: ODEPA, 2020a.

Figura 20. Superficie (1.000 ha), producción (1.000 t) y rendimiento (t ha^{-1}), entre las temporadas 1979-1980 y 1998-1999.

Distribución regional de la superficie, producción y rendimiento de arroz.

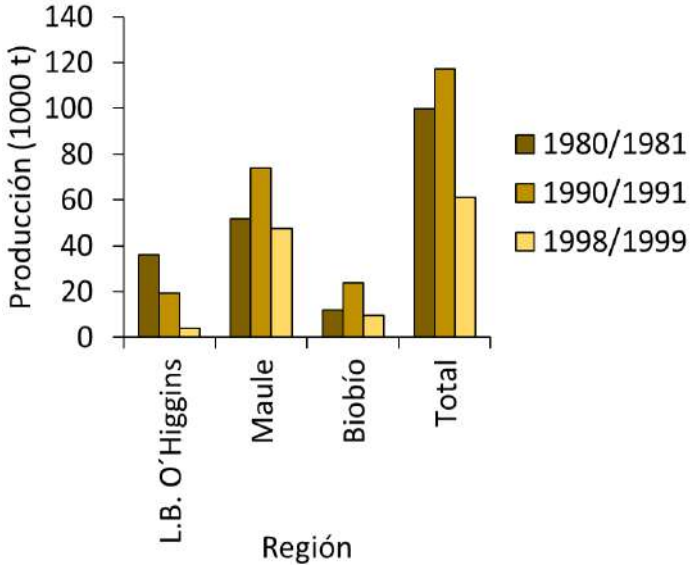
En esta etapa continuó el desplazamiento de la producción arrocera hacia el sur del país, lo que se vio reflejado con la desaparición de las siembras de arroz en la Región Metropolitana y una reducción paulatina de la superficie sembrada en la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins, posiblemente, por el uso del suelo en alternativas productivas más rentables en estas regiones, como frutales y hortalizas. Dada esta situación, la mayor superficie sembrada de arroz se concentró en la Región del Maule (Figura 21).



Fuente: ODEPA 2020b.

Figura 21. Superficie (1.000 ha) regional del cultivo de arroz, en las temporadas 1980-1981, 1990-1991 y 1998-1999.

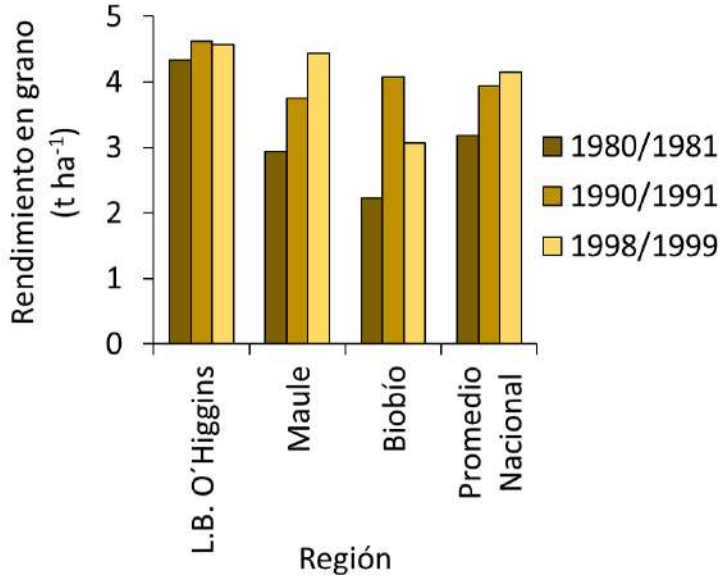
La producción regional siguió un patrón similar al de la superficie sembrada en cada región, destacándose la Región del Maule. Las menores producciones se lograron en la Región del Biobío en 1980-1981, y en la Región de O´Higgins en las dos últimas temporadas (Figura 22).



Fuente: ODEPA, 2020b.

Figura 22. Producción (1.000 t) de arroz, en las temporadas 1980-1981, 1990-1991 y 1998-1999.

El rendimiento promedio regional aumentó prácticamente en 1 t ha^{-1} si se comparan con los obtenidos en 1980-1981 de 3,2 t ha^{-1} vs 4,2 t ha^{-1} logrados en la temporada 1998/99, donde el mayor rendimiento se obtuvo en la Región de O´Higgins y el menor rendimiento en la Región del Biobío (Figura 23).



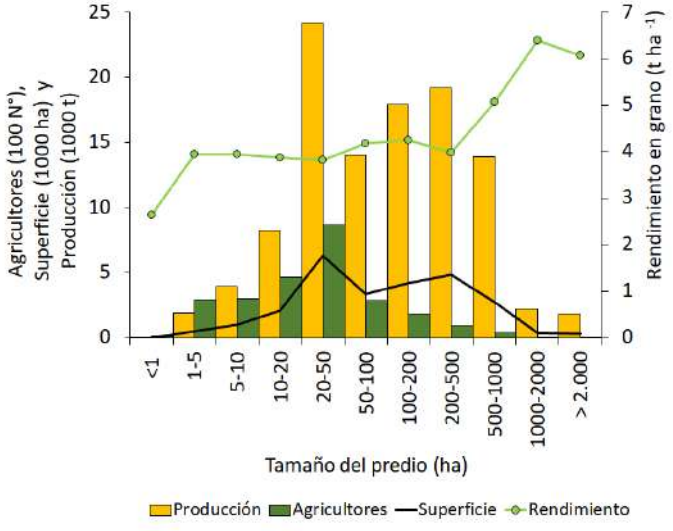
Fuente: ODEPA, 2020b.

Figura 23. Rendimiento (t ha^{-1}) de arroz en las temporadas 1980-1981, 1990-1991 y 1998-1999.

Distribución de los predios agrícolas con arroz

El Censo del año 1997 señala que en el país existían 2.537 predios agrícolas de diferentes tamaños dedicados a la producción de arroz, en los que se sembraron una superficie de 25.748 ha con rendimientos promedio de 4,2 t ha^{-1}. Si se comparan esas cifras con las del Censo del año 1975-1976 es posible observar una reducción de 316 predios arroceros a nivel nacional (2.537 vs 2.853), especialmente predios con superficies mayores a las 1.000 ha. Esta situación confirma también un cambio en la estructura de producción del arroz, al tener una mayor concentración en los agricultores medianos y pequeños.

En el Censo de 1997 se detectó un 87 % (2.218) de agricultores arroceros en predios menores a 100 ha y sólo un 0,3 %, es decir, siete agricultores, en predios mayores a 1.000 ha (Figura 13). Por otro lado, el cultivo del arroz ubicado en predios inferiores a 100 ha, tenían un rendimiento cercano a las 4,0 t ha^{-1}, con excepción de aquellos agricultores que poseían una superficie menor a 1 ha que alcanzaban rendimientos de sólo 2,6 t ha^{-1}. Los predios con superficies mayores a 1.000 ha obtenían un rendimiento en torno a las 6,0 t ha^{-1} (Figura 24).



Fuente: INE, 1997.

Figura 24. Agricultores (N°), superficie (1.000 ha), producción (1.000 t), rendimiento (t ha^{-1}), por tamaño del predio en el año 1996.

Factores limitantes, desafíos y tecnologías utilizadas en este período

Las bajas temperaturas siguen siendo un factor limitante en el cultivo del arroz, ya que afectan a los diferentes estados del crecimiento y desarrollo de la planta (germinación, plántula y floración), produciendo pérdidas de plantas, alargamiento del período vegetativo, reducción de la fotosíntesis (amarillez de las hojas) y alta esterilidad floral (vanazón) (Alvarado y Grau, 1991; Alvarado y Hernaíz, 1995).

En este período se empieza a recomendar un nuevo sistema de preparación de suelo, llamado ´fangueo`, donde en las últimas labores de preparación en suelo inundado, se utiliza un arado rotativo y un tablón nivelador o una alternativa conocida como ´fangueo con mínima labor` (Alvarado y Hernaíz, 1995), en comparación al sistema tradicional de preparación de suelos que

consistía en aradura, rastraje, cruza, rastraje y micro nivelación para lo cual se utilizaba tracción animal y/o mecánica (Sims, 1983b).

El problema de la desnivelación de los suelos arroceros empezó a tener una mayor preocupación y se empezó a recomendar el uso de un programa de ´adecuación` de los suelos y un levantamiento topográfico, que permitiera una mejor nivelación de los potreros. Esta nivelación de los suelos permitiría obtener cuadros más amplios, micronivelados y un menor número de pretiles, uso de maquinaria, mejor manejo del agua y una reducción de los costos de producción (Grau y Cisternas, 1986; Maldonado, 1986; Alvarado y Hernaíz, 1995).

A principios de los años 1980, el principal método de siembra continuaba siendo el sistema pregerminado, realizado en forma manual y al voleo o mediante aviones. La siembra por avión permitía mayor uniformidad, economía de semilla y un ahorro considerable de tiempo para realizar esta actividad (Sims, 1983b). Una pequeña superficie de siembra continuaba todavía utilizando el sistema de siembra almácigo-trasplante, especialmente entre los pequeños agricultores (Sims, 1983b).

Durante este período, ocurrió un cambio importante al liberarse nuevas variedades con mayor potencial de rendimiento y calidad de grano, como las variedades de grano corto ´Ñiquén-INIA` (Alvarado y Pino, 1979) y ´Quella-INIA` (Alvarado y Pino, 1982); la primera variedad de grano largo ancho ´Diamante-INIA` (Alvarado y Pino, 1982); la primera variedad de grano largo fino, ´Buli-INIA` (Alvarado et al., 1993); y la variedad ´Brillante-INIA`, precoz y de grano largo-ancho (Alvarado et al., 1997).

A principio de 1980 las variedades de mayor uso eran ´Oro`, ´Quella-INIA` y ´Diamante-INIA` (Sims, 1983a; 1983b; Grau y Cisternas, 1986b). La introducción al mercado de la variedad ´Diamante-INIA` produjo un cambio revolucionario en la producción y el consumo de arroz en el país, pasando de un grano pequeño y redondeado, representado por la variedad ´Oro`, a un grano largo-ancho. Es así como en el año 1995 se sembraba un 80 % de la superficie con variedades largo-ancho y sólo un 20 % con variedades de grano corto redondeado (Alvarado y Hernaíz, 1995). Otro aspecto importante asociado a las variedades, fue el aumento en el uso de semilla certificada. Estimaciones realizadas en el año 1983-1984 indicaban que sólo un 6 % de la superficie nacional usaba semilla certificada, en comparación con el 20 % usado en la temporada 1992-1993 (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Las malezas continuaron siendo un problema importante en el cultivo del arroz. Las principales malezas eran el hualcacho y la hualtata, que podían causar pérdidas importantes de rendimiento, si no se realizaba un control adecuado (Sims, 1983a). Se recomendaba que un buen control de malezas debería considerar una buena preparación del suelo, fertilización y manejo del agua y, además, una adecuada dosis de aplicación de productos (Alvarado et al., 1985; Pedreros y Alvarado, 1994). Los principales herbicidas recomendados en esa época eran: Stam (Propanil), Ordram (Molinate), Arrosolo 3-3S (Propanil+Molinate), Londax (Bensulfuron metil), Sirus, MCPA (sal potásica o amina) y Bentazón (Basagrán) (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Por otro lado, el manejo del agua seguía siendo un tema de preocupación y análisis. En ese sentido, estudios realizados en INIA indicaban que el manejo del agua por parte de los agricultores no era muy eficiente y que los caudales utilizados fluctuaban entre 2,1 y 11,2 L s^{-1} ha^{-1}, lo que significaba un uso de 181 a 968 m^3 ha^{-1} d^{-1} (18,1 a 96,8 mm). En tanto, las estimaciones de evapotranspiración señalaban valores que fluctuaban entre 6 y 11 mm d^{-1} ha^{-1}, dependiendo de la época del año y de las variaciones climáticas, lo que implicaba que un porcentaje importante de agua utilizada se perdía por percolación y filtraciones laterales (Alvarado y Hernaíz, 1995). En relación a la altura de agua, se recomendaba utilizar 10 cm entre siembra y floración y 20 cm entre la floración y llenado de grano (Maldonado y Alvarado, 1982; Alvarado y Hernaíz, 1995). Asimismo, se recomendaba que el corte del ingreso del agua al arrozal se podía realizar en la época de floración, grano lechoso o grano harinoso, manteniendo el agua estancada hasta el consumo total, sin afectar el rendimiento ni la calidad industrial del grano (Alvarado y Gallardo, 1994).

Los suelos arroceros presentaban un bajo nivel de fertilidad, lo que se había acentuado por el uso intensivo del suelo y la falta de rotaciones. Por ello, se recomendaba realizar una fertilización balanceada, utilizando nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), basada en los análisis de suelo (Rojas y Alvarado, 1982). Además, se recomendaba aplicar la mitad del nitrógeno y la totalidad del fósforo y del potasio a la siembra en el último rastraje, y la segunda dosis de nitrógeno a la macolla (Ortega y Belmar, 1990). En general, las dosis recomendadas fluctuaban entre 50 y 150 kg de N ha^{-1}; 30 y 60 kg de P_2O_5 ha^{-1} y 30-60 kg de K_2O ha^{-1} (Alvarado y Hernaíz, 1995).

En este período se detectaron algunos problemas sanitarios como la ´pudrición del tallo y de la vaina` (*Sclerotium hidrophilum*; *Rhizoctonia oryzae-sativae*) en algunas localidades de Parral, asociados a suelos que presentaban bajos niveles de potasio, por lo cual, la aplicación de potasio a la siembra, solucionó el problema (France y Alvarado, 1985; Ortega et al., 1991; Madariaga et al., 1999). El otro problema sanitario fue el ´manchado del grano` o ´Mancha Carmelita`, causado por un complejo de hongos. Su presencia estuvo asociada a la alta humedad ambiental y al uso de algunas variedades. Es así como, la variedad ´Diamante-INIA` presentó un menor porcentaje de manchado en comparación a la variedad ´Oro` (Alvarado et al., 1991). En relación a la presencia de plagas, se identificó al gorgojo del agua (*Neobagons coarticolis*) que podía causar pérdida de plantas en los primeros estados de desarrollo de la planta (Gerding y Grau, 1988; Gerding, 1989), la presencia de lama, y de patos silvestres (Sims, 1983b).

Aunque la cosecha se realizaba en forma mecanizada y semi-mecanizada, todavía existía un bajo porcentaje de agricultores que usaba la siega manual y engavillado. La tendencia creciente era el uso de la cosecha con automotriz. La recomendación del momento adecuado para la cosecha se daba cuando el grano poseía entre un 18 % y un 24 % de humedad, para obtener una buena calidad industrial (Alvarado y Lobos, 1986; Alvarado, 1990; Alvarado et al., 1993; Alvarado y Gallardo, 1994).

Mercado del arroz

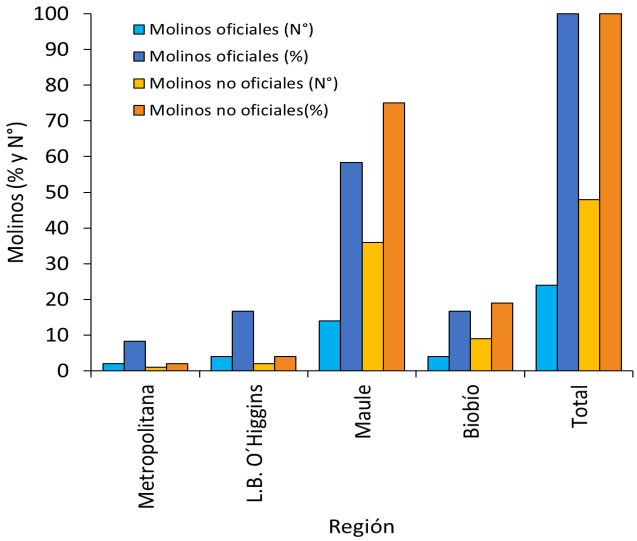
Durante este período la oferta del arroz paddy provino, principalmente, de los productores nacionales, salvo algunos años en que hubo un pequeño volumen de importaciones. La compra del arroz paddy lo realizaban los molinos arroceros, muchas veces bajo contrato con los agricultores. Los productos finales de la industria arrocera correspondían al arroz elaborado y subproductos (Fundación Chile, 1983).

El arroz elaborado se clasificaba en tres categorías: Extra o grado 1, que podía contener hasta un 5 % de grano partido; Escogido o grado 2, con hasta un 20 % de grano partido; y el Corriente o grado 3, con hasta un 35 % de grano partido. Los subproductos del arroz eran: harinilla, puntas y medias grana. Este último se empleaba para mezclar el arroz entero, en las proporciones de acuerdo al grado (Fundación Chile, 1983).

La oferta del arroz elaborado se originaba en los distribuidores mayoristas, supermercados, comerciantes minoristas y, ocasionalmente, en las importaciones. La oferta de los subproductos provenía de los productores de aves, huevos, porcinos y otros (Fundación Chile, 1983).

En el país sólo se había desarrollado la industria del arroz blanco pulido, ya que los otros productos, como los arroces pre-cocidos, arroces parbolizados, harinas extruidas y crudas, cereales preparados, entre otros, eran importados. En este aspecto, se realizaron algunos estudios para evaluar la posibilidad de producir arroz sancochado y extraer aceite de harinilla de arroz (Fundación Chile, 1983).

En relación a la industria molinera, en el año 1981 se pudieron identificar 30 molinos oficiales y 48 molinos no oficiales. La mayor cantidad de molinos se concentraba en la Región del Maule, zona de mayor producción de grano paddy del país (Figura 25).



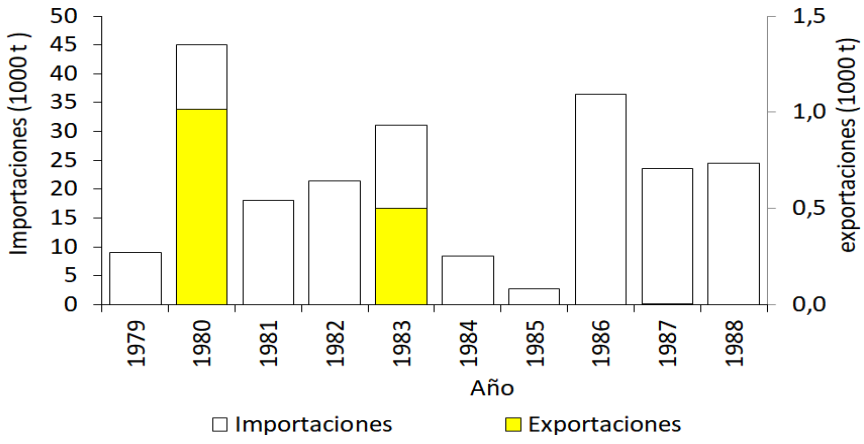
Fuente: Fundación Chile, 1983.

Figura 25. Molinos (% y N°) arroceros por región, en el año 1981.

El rendimiento de 100 kg de arroz paddy se dividía en los siguientes componentes: 20 kg de cáscara y 80 kg de arroz descascarado. Los 80 kg de arroz descascarados rendían 70 kg de arroz y 10 kg de subproductos. Los 70 kg de arroz producían 45 a 48 kg de arroz entero y 22 a 25 kg de arroz partido. Los 22 kg de grano partido producían 10 kg de puntas, 8 kg de media grana y 4 kg de arroz cervecero (Sims, 1983b).

Comercio internacional

La información disponible (entre los años 1979 y 1988) permite confirmar que el país era deficitario en la producción de arroz, por lo que debía recurrir a las importaciones para satisfacer las necesidades de la población. Sólo de manera muy eventual se lograban exportar pequeñas cantidades (Figura 26).



Fuente: Fundación Chile, 1983; Morales, 2002.

Figura 26. Importaciones (1.000 t) y exportaciones (1.000 t) de arroz.

Los agentes que participaban en este mercado eran, por el lado de la oferta, los molinos y los importadores. El arroz elaborado era distribuido a través de comerciantes mayoristas, almacenes y supermercados existentes a lo largo del país.

La mayor parte del arroz importado correspondía al tipo de grano largo fino, el que pasó a ser demandado por el consumidor después de la apertura del país al comercio externo. Los registros indicaban que las importaciones eran realizadas, principalmente, por los propios molinos y los distribuidores mayoristas y minoristas.

La cantidad de empresas que participaba en la importación del arroz era muy variada, y un número importante de esas empresas participaban sólo con pequeños volúmenes de arroz importado (Cuadro 4).

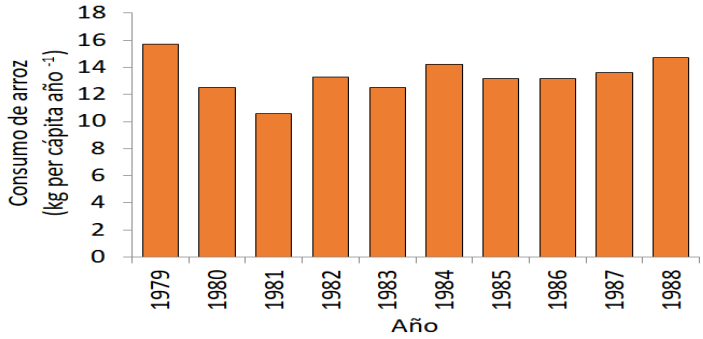
Cuadro 4. Principales importadores y volumen (%) importado de arroz en el periodo 1979-1982.

Importador	Participación (%) por año			
	1979	1980	1981	1982
Soc. Comercio Exterior Internacional	20,0	4,8	-	-
Importadora Café Do Brasil S.A.I.C.	15,4	-	-	-
Enrique Zaror y Cía. Ltda.	13,7	2,8	-	-
Cía. Introductora de Alimentos Ltda.	11,2	2,4	-	-
Empresa Nacional de Com. y Distr. S.A.	7,7	2,7	-	-
Soc. Ind. Frigorífico San Miguel	6,3	0,5	4,4	9,4
Aruba S.A.	6,0	4,8	-	-
Intar/Chile Ltda.	-	4,2	-	-
Arrocera Tucapel	-	4,8	20,6	7,2
Compañía Industrial	-	8,7	23,4	19,1
Comercial Chacao	-	0,3	24,5	16,5
Otras	19,7	4,2	27,1	47,8
Total	**100**	**100**	**100**	**100**

Fuente: Fundación Chile, 1983.

Consumo aparente

En el periodo 1979-1988, el consumo aparente de arroz fluctuó entre 10,6 y 15,7 kg hab^{-1} $año^{-1}$ (Figura 27). Si comparamos estas cifras con las del período anterior, se advierte que el consumo de arroz presentó un leve aumento.



Fuente: Morales, 2002.

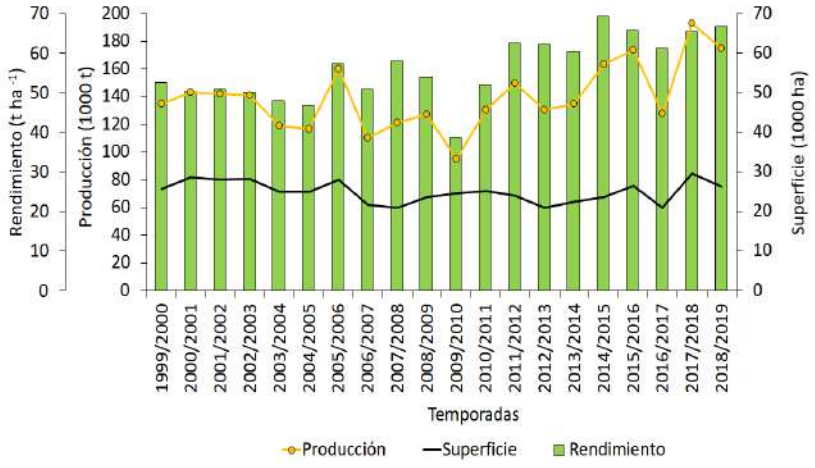
Figura 27. Consumo aparente (kg per cápita año^{-1}) de arroz, entre los años 1979 y 1988.

Etapa 1999-2020

Superficie, producción y rendimiento nacional.

Durante esta etapa se observó una estabilización de la superficie sembrada en 25 mil ha promedio. Sin embargo, cabe destacar que el rendimiento sufrió un significativo aumento, sobrepasando las 5,0 t ha^{-1} y llegando a 6,9 t ha^{-1} en el año 2014 (Figura 28). A pesar de este importante incremento, se considera que aún es posible aumentar los rendimientos, debido a que las variedades tienen un potencial superior a 12,0 t ha^{-1}.

En la actualidad, los problemas a resolver se relacionan con el mejor uso de las prácticas agronómicas por parte de los agricultores, para que las variedades comerciales expresen su potencial de rendimiento (Paredes et al., 2015). Esta situación quedó demostrada en el Primer Concurso Nacional de Producción de Arroz, realizado la temporada 2013-2014, donde participaron 25 agricultores separados en las categorías mediano-grandes y pequeños. En este concurso, los mejores resultados lo obtuvieron dos pequeños agricultores con rendimientos de 12,2 y 12,1 t ha^{-1} en una superficie de dos ha; y dos agricultores medianos que alcanzaron rendimientos de 10,9 y 9,2 t ha^{-1}, en una superficie de 10 ha (Parada y Paredes, 2014; González et al., 2013; Parada et al., 2015). Unido a esta información, no es extraño conocer experiencias de agricultores que, usando la tecnología recomendada, obtienen rendimientos de 8,0 a 9,0 t ha^{-1}, en superficies superiores a 100 ha (Carlos Cisternas, comunicación personal).

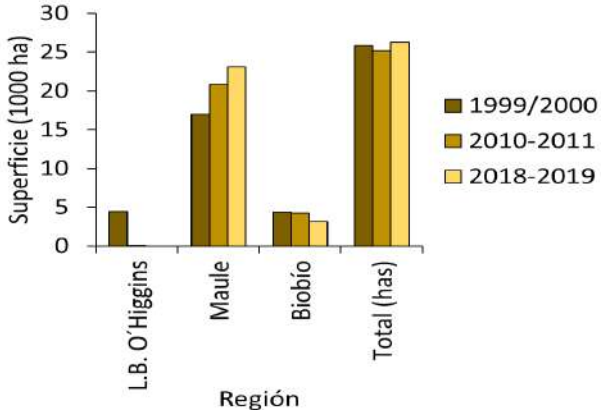


Fuente: ODEPA, 2020a.

Figura 28. Superficie (1.000 ha), producción (1.000 t), rendimiento de arroz (t ha^{-1}), entre las temporadas 1999-2000 y 2018-2019.

Distribución regional de la superficie, producción y rendimiento de arroz

En esta etapa se observó un desplazamiento de la superficie sembrada de arroz hacia el sur del país. Es así como en la región de O´Higgins, que durante la temporada 2010-2011 la superficie sembrada alcanzaba las 61 ha, a partir de la temporada 2018-2019 la siembra se detuvo totalmente. Ello se debe, principalmente, al cambio de los agricultores hacia otras alternativas más productivas y menos demandantes de agua. Esto ha transformado a Maule en la región con la mayor superficie sembrada de arroz, y marcado la desaparición de la región de O´Higgins del espectro arrocero. Paralelamente, durante la misma temporada se producía una disminución en la superficie de siembra en la región del Biobío (Figura 29).

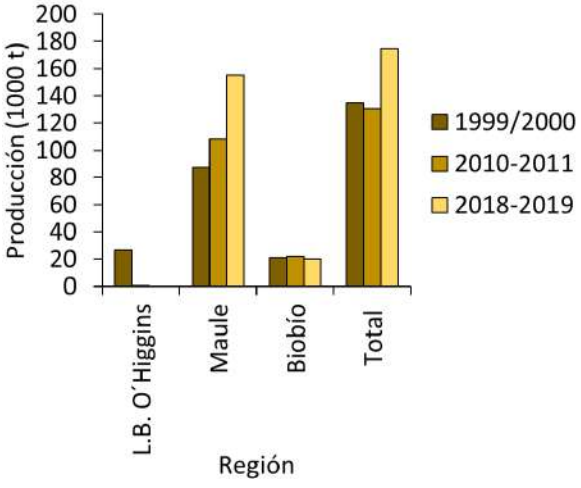


Fuente: ODEPA, 2020b.

Figura 29. Superficie (1.000 ha) regional del cultivo de arroz, en las temporadas 1999-2000, 2010-2011 y 2018-2019.

*A partir del año 2017 la producción de arroz es considerada en la nueva Región de Ñuble tras su separación de la Región del Biobío.

La producción regional siguió una tendencia similar de la superficie sembrada, donde la mayor producción se concentró en la región del Maule, seguida ahora por la región del Biobío (Figura 30).

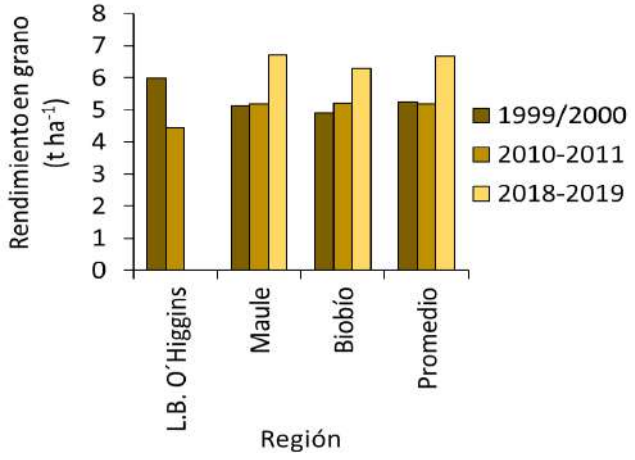


Fuente: ODEPA, 2020b.

Figura 30. Producción (1.000 t) regional de arroz, en las temporadas 1999-2000, 2010-2011 y 2018-2019.

* A partir del año 2017, la producción de arroz es considerada en la nueva Región de Ñuble, que se separó de la Región del Biobío.

El rendimiento promedio nacional continuó en aumento, llegando a 6,7 t ha^{-1}, muy lejano a las 2,6 t ha^{-1} observadas en la temporada 1963/64. Esta situación se vio reflejada en importantes aumentos de rendimientos en las regiones del Maule y Ñuble en la temporada 2018-2019 (Figura 31).



Fuente: ODEPA, 2020b.

Figura 31. Rendimiento (t ha^{-1}) de arroz, en las temporadas 1999-2000, 2010-2011 y 2018-2019

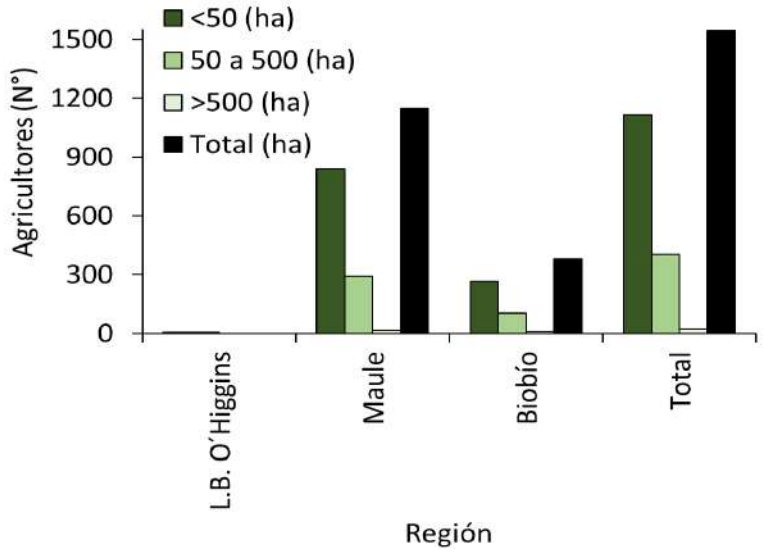
* A partir del año 2017, la producción de arroz es considerada en la nueva Región de Ñuble, al separarse de la Región del Biobío.

Estructura productiva por tamaño de predios agrícolas con arroz

El Censo realizado el año 2007 mostró que el número de predios arroceros era de 1.542, lo que significó una disminución importante con respecto a la cifra obtenida en el censo anterior, cuando se contabilizaron 2.537 (INE, 2007).

La distribución de los agricultores por tamaño de los predios agrícolas arroceros, mostró una amplia concentración en la región del Maule (74,5 %), seguido por la región del Biobío, con un 24,7 %. Por otro lado, un 72,4 % del total de las siembras de arroz están asociadas a predios que poseen un tamaño menor a 50 ha, seguidas de un 26,1 % de predios entre 50 y 100 ha y sólo un 1,6 % con predios mayores a 500 ha (Cuadro 29), lo que significó un cambio significativo en el tamaño de predios arroceros en comparación a los datos del censo anterior (INE, 1977).

La distribución regional por tamaño de explotación indicó que el 75,4 % de los predios menores a 50 ha se ubicaron en la región del Maule, así como el 72,6 % de los que van entre 50 a 500 ha y el 62,5% de los mayores a 500 hectáreas. El número de predios en la región de O´Higgins fue bastante reducido (13 en total), lo que concuerda con la tendencia del desplazamiento del cultivo del arroz hacia el sur del país. En tanto, la región del Biobío, concentró un 23,9 % del total de los predios menores a 50 ha, un 25,9 % de los predios entre 50 y 500 ha y un 37,5 % de los predios mayores a 500 ha (Figura 32).

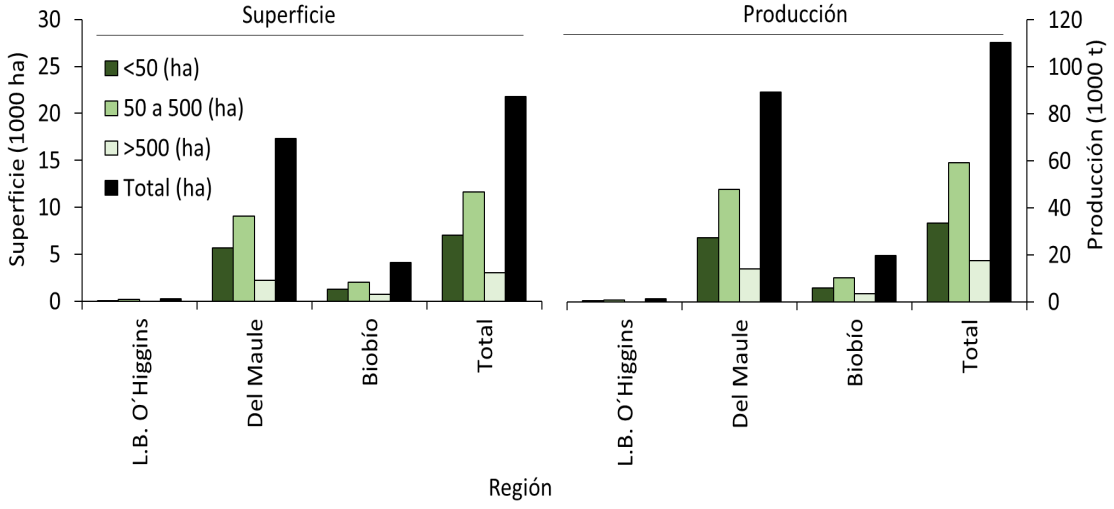


Fuente: INE, 2007.

Figura 32. Distribución regional de los agricultores (N°), en la temporada 2006-2007.

Distribución regional de superficie y la producción de arroz, por tamaño de predios agrícolas con arroz en el año 2007

La superficie sembrada con arroz se concentró principalmente en la región del Maule y en los predios de 50 a 500 ha, los que representaron, aproximadamente, un 50 % de la superficie sembrada y de la producción total del país (Figura 33).



Fuente: INE, 2007.

Figura 33. Distribución de la superficie (1.000 ha), producción (1.000 t) y tamaño de predios (ha), por regiones.

Factores limitantes, desafíos y tecnologías utilizadas

Durante este período, la zona productora de arroz quedó definida desde la comuna de Linares, provincia de Linares, Región del Maule por el norte, hasta la comuna de San Carlos, provincia de Diguillín, Región de Ñuble, por el sur y se concretaron varios cambios tecnológicos (Paredes et al., 2015).

La baja temperatura es un factor determinante en la adaptación de la planta de arroz a la zona arrocera del país. En Chile, se cultiva el arroz *japonica* templado de grano largo superior a 6,5 mm y relación largo/ancho inferior a 3,0 (INN, 1989; 2003a; 2003b).

Dadas estas restricciones, todo el germoplasma introducido debe tener tolerancia a frío y la calidad de grano anteriormente mencionada. Lamentablemente, con escasas excepciones, el material introducido que se adapta a nuestras condiciones climáticas no logra florecer o madurar y, si lo hace, no cumple con las características de calidad del grano requerida por los consumidores y la industria (Becerra et al., 2015b). Por ello es que se decidió reforzar y fortalecer el trabajo de evaluación y selección de material genético tolerante a frío (Donoso et al., 2013; Cabas, 2012; Donoso et al., 2014; 2015a; 2015b). En este sentido, para tener un registro adecuado de las condiciones climáticas en la zona arrocera, en el año 2012 se instalaron cuatro estaciones meteorológicas, de las cuales tres estaciones fueron financiadas por el INIA en conjunto con las Empresas Tucapel S.A. y Carozzi S.A., y ubicadas en las comunas de San Carlos, Parral y Longaví. La cuarta estación fue adquirida por La Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, y fue instalada en esa comuna. Las estaciones compradas por el INIA y empresas molineras fueron incorporadas a la Red de Estaciones Meteorológicas que administra el Ministerio de Agricultura y la otra estación forma parte de una Red manejada por la Universidad de Talca (Paredes et al., 2015). Paralelamente, se realizó una difusión importante sobre la conveniencia de sembrar en una época adecuada, los primeros 20 d de octubre, para disminuir el riesgo de las bajas temperaturas en la época de floración y las consecuencias sobre la esterilidad floral (Donoso y Paredes, 2015).

Una práctica que mejoró sustancialmente, en relación a las décadas pasadas, fue la nivelación de los suelos arroceros (Hernaíz y Alvarado 2007b; Quezada et al., 2013a; 2013b). La información disponible indica que entre el 90 y 95% de los suelos arroceros están nivelados, gracias a los beneficios entregados por los programas de apoyo y subsidios ofrecidos por INDAP (R. Henríquez; Alfredo Mariño; com. personal, 2018). En la preparación de suelos se incorporaron nuevas prácticas agronómicas, como la incorporación del rastrojo, el arado rotativo, el barbecho químico mediante la aplicación de herbicidas no selectivos y el uso de rotofresadora para incorporar los fertilizantes aplicados en cobertera, y la preparación del suelo (Riquelme et al., 2015).

El sistema de siembra fue evolucionando desde un sistema manual y al voleo con semilla pregerminada, al uso del avión que fue adquiriendo cada vez mayor importancia. La dosis de semilla utilizada en una siembra al voleo es de 150 kg ha^{-1}, aunque algunos agricultores usan una cantidad mayor. En siembras realizadas con avión la dosis varía entre 120 y 140 kg ha^{-1}. El objetivo final es obtener 200 a 250 plantas m^{-2} (Alvarado y Hernaíz, 2007). Por otro lado, el sistema de siembra directa, con y sin taipas, se ha ido incorporando lentamente al cultivo, llegando a ocupar un 20 % de la superficie sembrada en arroz. Una de las principales ventajas que presenta el uso de este sistema de siembra es la incorporación de un mayor grado de mecanización en diferentes labores del cultivo como la nivelación del suelo, siembra mecanizada, aplicación de fertilizantes, control de malezas y el menor uso del agua en los primeros estados de desarrollo del cultivo (Parada et al., 2013a; 2013b; Henríquez et al., 2018).

En relación al manejo del agua, se realizó una estimación de la huella hídrica en el cultivo del arroz, la que dio por resultado una huella de entre 955 y 1.225 L kg^{-1}, una huella azul entre 754,1 y 1.145 L kg^{-1}, una huella verde de entre 17,3 y 138,8 L kg^{-1} y una huella gris de 62,5 L kg^{-1} (Uribe y Riquelme, 2015). Por otro lado, se confirmó que el sistema inundado produce un mayor rendimiento en grano (Quezada et al. 2013a; Gutiérrez, 2019), posiblemente, por el mejor control

de malezas y la regulación de la temperatura, comparado con otros sistemas de manejo de agua, como el riego intermitente (Quezada et al., 2011; Gutiérrez, 2019) y el riego por aspersión (Donoso et al., 2019). Sin embargo, debido a las restricciones hídricas se ha observado el uso de una menor altura de agua (5 cm), desde la siembra a la macolla, que favorece el desarrollo de las plantas y un número mayor de macollas (Hernaíz y Alvarado, 2007a; Donoso et al., 2015b) y una altura máxima de 20 cm en la etapa reproductiva (Hernaíz y Alvarado, 2007a) y de 10 a 20 cm (Henríquez et al., 2018), lo cual se debe acompañar con la introducción de nuevas tecnologías de riego que permitan mejorar la gestión del agua en el sector arrocero del país (Donoso et al., 2019; Becerra et al., 2020).

En el caso de la fertilización, se empezó a utilizar un criterio conservacionista de fertilidad de los suelos, basado en reponer la cantidad de nutrientes extraídos por las plantas, para mantener el nivel de fertilidad del suelo en el tiempo. En este sentido, se realizaron diversos estudios tendientes a conocer el nivel de cada nutriente en el suelo, sus niveles de extracción y su relación con el rendimiento, el efecto del manejo de los residuos (incorporación o quema) en los niveles de los nutrientes, tales como potasio, calcio, azufre y microelementos (Hirzel y Cordero, 2011; Hirzel, 2007; Quezada et al., 2013c).

El análisis de muestras de suelos representativos de la zona arrocera indicó un bajo nivel de nutrientes en los suelos arroceros y un pH leve o moderadamente ácido (5,5 y 6,4). El contenido de materia orgánica fluctuó entre 1,6 y 3,5 %, el nivel de fósforo disponible fue inferior a 10 ppm, el potasio menor a 100 ppm y el contenido de nitrógeno incubado varió entre 11 y 50 ppm (Hirzel, 2007). Dada estas condiciones, el diagnóstico del estado nutricional, a través del análisis de suelo, pasó a ser una herramienta indispensable en la recomendación de fertilización del suelo. Esta herramienta de diagnóstico ha sido estimulada y recomendada por el Programa de Recuperación de Suelos degradados del Ministerio de Agricultura, desde el año 2000 (Hirzel, 2007). Por otro lado, para mejorar el diagnóstico nutricional de los suelos, se incorporó en el análisis de laboratorio de INIA Quilamapu, ubicado en Chillán, la evaluación de nitrógeno incubado (mineralizable) que representa, de mejor manera, la situación mayoritaria del sistema del cultivo del arroz bajo inundación (Hirzel et al., 2012) y se desarrolló un modelo de optimización del nitrógeno a aplicar en el cultivo para diferentes condiciones de suelo (Artacho et al., 2011; Hirzel et al., 2011; 2012; Hirzel y Rodríguez, 2013; Hirzel, 2015; Hirzel et al., 2020). También se estudió el efecto de diferentes enmiendas orgánicas como una fertilización alternativa en el cultivo (Hirzel, 2013) y la respuesta varietal a diferentes dosis de nitrógeno (Quezada et al., 2013b; Hirzel et al., 2019).

Las malezas continuaron siendo uno de los problemas agronómicos más limitantes de la producción de arroz (San Martín y Ramírez, 1983; Pedreros y Kramm, 2007). De las malezas comunes presentes en el arroz, el hualcacho es la que produce las mayores pérdidas en el rendimiento del cultivo, lo que puede variar entre un 25,5 a un 49,1 %. El segundo grupo en importancia son las ciperáceas, como la cortadera (*Cyperus difformis* y *C. eragrostis*), y el pasto cabezón (*Scirpus mucronatus*). Estas malezas han aumentado su importancia en los últimos años, y sus pérdidas se estiman entre 15,6 y 44,7 %. El tercer grupo de malezas son las alismatáceas como la hualtata (*Alisma plantago-aquatica*; *A. lanceolatum*) y lengua de vaca (*Sagitaria montevidensis* subsp. *chilensis*), perennes y emergentes, que pueden causar pérdidas que pueden variar entre 11 y 67 % (Pedreros y Kramm, 2007).

En la estrategia de control se ha incorporado el concepto de manejo integrado, donde se incluye el control cultural (nivelación, manejo de agua, uso de semilla certificada, siembra oportuna, fertilización) y el control químico. Los principales herbicidas recomendados en este período fueron: bensulfuron (Londax, Stoke), ethoxysulfuron (Sunstar); metsulfuron (Ally, Ajax; Aliado, Kajax, Sulfumet), pyrazosulfuron (Sirus), cyclosulfamuron (Orysa), penoxulam (Rice), pyanchor (Nominee); cyhalofop-butil (Clincher), bentazon (Basagran, Bentax), propanil, (Amidas); MCPA amina y sal potásica; quinclorac (Facet, Exocet), molinate (Molirox), florpyrauxifen benzyl (Loyant) y imazamox+Imazapir (Eurolightning) (Pedreros y Kramm, 2007; Henríquez et al., 2018). Otros

aspectos que ha ido adquiriendo mayor importancia en el control de malezas es el desarrollo de la resistencia de algunas malezas a ciertos productos químicos (Pedreros y Kramm, 2007) y la presencia del arroz rojo (Pedreros y Alvarado, 1994; Alvarado y Pedreros, 1991; 2007).

En mejoramiento genético, se desarrollaron cinco variedades, de la cuales cuatro ya están en el mercado y una de ellas se incorporó en la temporada 2020-2021. Las variedades liberadas fueron: ´Ámbar-INIA` (Alvarado y Hernaíz, 2005), primera variedad de grano glutinoso; ´Zafiro-INIA` (Hernaíz et al., 2005; Cordero et al., 2010) y ´Cuarzo-INIA` (Cordero et al., 2011), variedades de grano largo-ancho; ´Platino-INIA`, la primera variedad de grano medio (Paredes et al., 2016) que reemplazó a la variedad ´Oro` y cubrió una demanda de nicho para, sushi y risotto, entre otros; y la variedad ´Digua Cl`, primera variedad Clearfield *japonica* templada de grano largo-ancho (Salvo et al., 2015; Becerra et al., 2019; Paredes et al., 2019; 2020) que fue generada en ocho años.

Además del desarrollo de nuevas variedades, se usaron marcadores moleculares, SSR y SNP sobre la caracterización genética del germoplasma de arroz del PMGA. Asimismo, se certificaron genéticamente progenitores y progenies, se identificaron variedades y líneas experimentales avanzadas, se certificó la pureza de ´Platino-INIA` y de ´Digua Cl` en su proceso de registro en el SAG (Becerra, et al. 2015a; 2017). Los resultados indicaron que existe una media a baja diversidad genética en el germoplasma utilizado y baja entre algunas variedades comerciales desarrolladas.

En aspectos relacionados con la calidad del grano, en el año 2011 se realizó un levantamiento de información de los laboratorios de las empresas molineras, con el objetivo de estandarizar los equipos y procesos utilizados en el muestreo destinados a la evaluación de la calidad del grano recibido en sus plantas (Cordero, et al., 2011b).

En relación a la transferencia de tecnología, todas las variedades desarrolladas por INIA están en el mercado a disposición de los agricultores, a través de distribuidores privados o en convenio con INDAP. En este sentido, es importante mencionar el desarrollo de un número importante de programas de apoyo ofrecidos por INDAP a la pequeña agricultura, tales como, el uso de semilla certificada, mejoramiento de suelos degradados, nivelación de suelos, riego intra-predial, contrato de proveedores, entre otros, que han contribuido a adoptar nuevas tecnologías. En los aspectos de difusión tecnológica, se han realizado una gran cantidad de actividades por parte de INIA, empresas molineras, de agroquímicos y de asistencia técnica tendientes a entregar y difundir la información relevante a los agricultores.

En el año 2010, el Gobierno de Chile y las organizaciones Fedearroz y Fenarroz, firmaron un convenio con el Fondo Latinoamericano de Arroz de Riego, FLAR, para apoyar el desarrollo de germoplasma y la introducción de nuevas prácticas agrícolas, como la siembra directa o ´siembra en seco` al sector arrocero. En esta instancia técnica, el Gobierno de Chile estuvo representado por INIA, INDAP, FIA y ODEPA, además de las federaciones de agricultores Fedearroz y Fenarroz (Subsecretaría de Agricultura, 2011) y a partir del 2014 el convenio se amplía a la Empresa Tucapel S.A. y Carozzi S.A. (Subsecretaría de Agricultura, 2014). Producto de este convenio, INIA y Fedearroz recibieron germoplasma desarrollado por el FLAR, para su evaluación y selección bajo las condiciones chilenas. INDAP coordinó las acciones relacionadas con el trabajo agronómico, como la siembra directa.

Durante este período se empezó a mostrar una mayor preocupación por la sustentabilidad del sistema de producción del arroz. Así, se desarrollaron varias iniciativas a nivel del Ministerio de Agricultura (Acuña et al., 2018) y se reforzaron e iniciaron diferentes líneas de investigación tales como, la cuantificación de la emisión de gases efecto de invernadero (Hube et al., 2015; Becerra et al., 2019), selección de germoplasma a bajas temperaturas (Donoso et al., 2013; 2015a; Becerra et al., 2020), manejo eficiente del agua (Donoso et al., 2019; Fedearroz, 2019), inocuidad (prospección de niveles de arsénico en el suelo, agua y grano de arroz (Ramírez et al., 2019).

En esta área se desarrolló un estudio destinado a definir un estándar de sustentabilidad para el sector arrocero, en el cual participó toda la cadena arrocera (Fundación Chile, 2015). Este estudio permitió identificar algunas temáticas tendientes a disminuir o mitigar los impactos en la emisión de gases de efecto invernadero (incorporación de rastrojos, fertilización, etc.), gestión en el manejo del agua, eficiencia energética, y prácticas que protejan y contribuyan al desarrollo de la biodiversidad biológica. Dado esta situación, se recomendó desarrollar un programa de investigación y de difusión y transferencia de tecnologías en dichas materias (Fundación Chile, 2017).

El arroz es un cultivo que, por su sistema de manejo bajo lámina de agua, emite una importante cantidad de gases efecto invernadero (GEI). Por tal motivo, en el año 2012 se inició un proyecto de investigación para cuantificar las emisiones de los gases efecto invernadero en el cultivo del arroz, considerando diferentes condiciones de manejo como fertilización nitrogenada, incorporación del rastrojo al suelo (Hube et al., 2015) y el manejo de agua a través de un proyecto internacional co-financiado por FONTAGRO en el que participaron Fedearroz Colombia, INIA Chile, y la Universidad de la Molina de Perú (Fedearroz, 2019). Este trabajo permitió la incorporación y participación del INIA en el Comité del Arroz en Global Research Alliance (GRA, sigla en inglés), en el Grupo de Investigación en Arroz de Riego (PRRG) y en actividades de difusión sobre este tema (Becerra et al., 2018).

En los últimos años ha aumentado la preocupación por una mayor inocuidad de los alimentos, entre ellos, la presencia del contenido de arsénico en el grano de arroz. Por tal motivo, INIA desarrolló en la temporada 2015/16, un proyecto de investigación tendiente a cuantificar el nivel de arsénico en el suelo, agua y variedades sembradas en el sector arrocero (INNOVA-CHILE). Los resultados indicaron que el arroz producido por las diferentes variedades de arroz producidas en el país, se encuentran bajo la norma nacional e internacional en relación a este elemento (Mario Paredes, com. personal). Desde agosto del 2020, este trabajo se continuará bajo el alero de un proyecto co-financiado por FONDEF IT, INIA, Universidad de Concepción, ACHIPIA, Empresa Tucapel, S.A y Nestlé-Chile (V. Becerra, comunicación personal, 2020).

Cadena de producción y comercialización del arroz

En la cadena de producción y comercialización del arroz se distinguen diferentes actores como los productores, procesadores, distribuidores, comercializadores, transportistas y consumidores, todos los cuales cumplen diferentes funciones en la cadena productiva (Espinoza y Farías, 2017).

Principales características de la cadena arrocera

Hacia fines del siglo XX, Chile producía un 60 % de las necesidades de consumo, y el resto se importaba, principalmente desde Argentina y Uruguay, y algunos países asiáticos, como Vietnam y Tailandia. Las importaciones correspondían a grano elaborado y eran realizadas por comerciantes mayoristas y supermercados. En este punto, se consideraba que no era viable exportar importantes cantidades de arroz, fundamentalmente por razones de calidad; prácticamente el 100 % del arroz producido, se elaboraba y consumía en el país.

La semilla utilizada por los agricultores para su siembra era proveída en un 100 % por INIA. La multiplicación de las etapas de certificación de la semilla de INIA, era realizada con particulares bajo contrato y el uso de semilla certificada entre productores era bajo. Más del 90 % de las siembras se realizaban con la variedad ´Diamante-INIA` y un pequeño porcentaje con la variedad ´Oro`. Gran parte de la comercialización del arroz se hacía bajo contrato, y un menor porcentaje a través de corredores y la comercializadora de trigo COTRISA. La capacidad instalada de molienda de arroz alcanzaba las 250 mil toneladas, lo que duplicaba las necesidades de procesamiento. Existían alrededor de 80 molinos arroceros, de ellos, aproximadamente 20 eran considerados

industriales. La empresa Tucapel procesaba entre el 50 y 60 % del total, mientras que Zaror y San Cristóbal alcanzaban entre un 10 y 15 % cada uno. Una parte importante de la industria arrocera estaba asociada a Asociación Gremial de Molineros de Arroz (AGMA). El 80 % del producto elaborado iba a los consumidores directos y el 20 % a las instituciones (Scarlato, 2000).

Los agricultores representaban alrededor de 1.500 predios arroceros, de los cuales más de un 70 % eran predios menores a 50 hectáreas, ubicados, principalmente, en las regiones del Maule y Ñuble. Los agricultores estaban agrupados en varias organizaciones gremiales, tales como, la Federación de Productores de Arroz de Chile (Fedearroz), la Federación Nacional de Arroceros de Chile (Fenarroz), Asociación Gremial de Arroceros de Unicavén, Asociación Gremial de Comités Campesinos Rubro Arroz, Comité Campesino El Crucero de Buli, Comité Campesino Productores de Arroz Millauquen Unido y Comité Campesino Arrocero Otingue, Belén y Flor de Ñiquén.

Los procesadores eran los encargados de adquirir el arroz cosechado, a través de contratos o compras ´spot` de arroz paddy a los agricultores locales, sin la participación de otras empresas o de agentes intermediarios, distribuidores y/o comercializadores. La industria local estaba involucrada en las etapas de acopio, secado, elaboración, almacenamiento y distribución (Espinoza, 2018). La relación comercial entre el procesador y el distribuidor (venta al detalle) se basaba en una negociación bilateral, en la cual se fijan los precios de venta y gastos indirectos, como fondos promocionales, mermas, arriendo según ubicación en góndola, entre otros (Lara, 2017).

Un estudio destinado a realizar una ´estandarización del proceso de muestreo de calidad en las arroceras nacionales`, detectó la presencia de 23 industrias arroceras activas en el país correspondientes a Empresas Tucapel S.A., Empresas Carozzi S.A., Arrocera Aruba, Arrocera Blanqui, Arrocera Don Claudio, Arrocera Flor de Ñiquén Ltda., Arrocera Los Llanos, Arrocera Nacional, Arrocera Ñuble, Arrocera Orsini Hnos., Arrocera Palmera, Arrocera Palmilla S.A., Arrocera Sta. Mónica, Arrocera Vitacura, Comercializadora de Trigo S.A (COTRISA), Comercial Industrial Sta. Regina Ltda., Industria Molinera Sta. Marta Ltda., Productos Corán S.A., Pelentaro, Agroindustrial Reina Luisa, Comercial Milanese y Cia Ltda., y la Sociedad Comercial Industrial Aparicio y García (Cordero et al., 2011b). Sin embargo, son dos las empresas que poseen una alta participación en el mercado nacional: Tucapel S.A. (40 %) y Carozzi, S.A. (20 %). Estas empresas son prácticamente los proveedores exclusivos de un tipo de grano producido en el país y que posee una alta valoración de parte de los consumidores por razones idiosincráticas (Espinoza, 2018; García y Laval, 2020).

En el comercio nacional del arroz, uno de los logros importantes en este período fue la confección del indicador de Costo Alternativo de Importación (CAI) de Arroz Paddy, que se usa como referencia en la comercialización del arroz nacional. El CAI del arroz corresponde al valor CIF de un arroz, elaborado hasta con 15 % de grano partido, que posteriormente se convierte a paddy. El costo considera el arancel y los gastos de importación ponderados de los países que componen al menos el 85 % del volumen importado los últimos seis meses, según datos del Servicio Nacional de Aduanas, puesto en Santiago (incluye fletes y seguros), más todos los gastos asociados al proceso de internación. Los costos asociados a la internación son consensuados por un comité técnico, formado por representantes de la industria, COTRISA y ODEPA. El valor del dólar utilizado corresponde al promedio del dólar observado del Banco Central de Chile durante la semana en que fueron solicitadas las cotizaciones a la industria importadora local. Las cotizaciones de arroz importado a Chile son informadas a ODEPA por las mayores industrias importadoras del país, a través de un Convenio de Cooperación que garantiza la absoluta confidencialidad de sus valores. En el caso de aquellos mercados de referencia para los que las industrias importadoras no informan cifras, se considera el valor promedio de las importaciones del último mes del arroz semi-blanqueado o blanqueado, incluso pulido o glaseado, grano partido mayor al 5 %, pero menor al 15 % (ODEPA, 2020b).

Para mejorar la representación del CAI, se ha sugerido reemplazar el mayor valor de importación

del grano largo-angosto, por el valor comercial del arroz largo ancho producido en el país, ya que posee un mayor valor comercial. También se ha planteado cambiar el porcentaje de grano utilizado (48 %), por el vigente en 2018 que variaba entre un 55 y 57 %, según datos de los Servicios de Asistencia Técnica (Espinoza, 2018).

Otro elemento importante en la cadena productiva del arroz lo constituyen las empresas distribuidoras-comercializadoras que representan el principal canal de distribución, donde destacan las cadenas de supermercados que concentran entre un 65 y un 70 % del volumen de las ventas. Del porcentaje restante, una parte importante está destinada a los hoteles, restaurantes y casinos, y una menor proporción a pequeños almacenes y mercados (Espinoza, 2018).

En este punto es importante mencionar también, la incursión de las marcas propias del retail, específicamente introducidas por los supermercados, en los segmentos de variedades de origen nacional e importado. Esta situación, generó efectos importantes en el comercio del arroz, tales como, un incremento de las marcas propias en arroz Grado 1, pero especialmente en el Grado 2, debido al menor valor de estos productos en relación a su calidad. Esta situación significó, paralelamente, el desplazamiento e incluso la eliminación del mercado de marcas de empresas procesadoras pequeñas o importadoras, dando lugar a una mayor concentración del mercado y donde los principales proveedores se favorecieron por el incremento de su participación en el mercado y en sus márgenes. Esta última situación se debió, principalmente, a la estrategia de los distribuidores de enfocar sus esfuerzos en la penetración de mercado de sus marcas propias, sin enfrascarse en una competencia directa con los principales proveedores que podían perjudicar las ventas de la categoría de forma transversal. Por otro lado, se empezó a observar un mayor poder de negociación de los distribuidores con los proveedores, para obtener mejores precios (Lara, 2017).

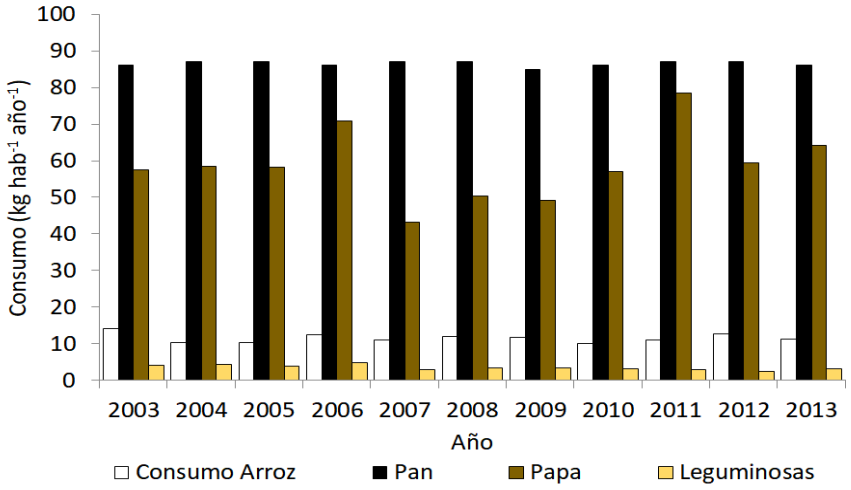
Los principales productos disponibles en el mercado local son los productos derivados del arroz blanco, grano largo-ancho de origen nacional; los productos derivados de los granos largo delgado, que tienen un origen importado; y en menor proporción los productos de arroz parbolizado, conocido también como pregraneado o precocido; el arroz integral elaborado con variedades nacionales; los arroces con ingredientes o instantáneos que incorporan verduras u otros ingredientes adicionales de rápida preparación, ya que se elaboran con arroz pregraneado; y los arroces para sushi, basmati o carnaroli (Espinoza y Farías, 2017; Espinoza, 2018).

Para su comercialización, los arroces elaborados se clasifican en Grado 1, cuando el contenido de granos partidos alcanza hasta un 5 %, y en Grado 2, cuando el contenido de grano partido llega hasta un 20 %. Esta norma, clasifica también al arroz de acuerdo con las dimensiones del grano en: largo-ancho, largo-delgado, mediano y corto (INN, 2003a; 2003b). Todo lo anterior permite señalar que el consumidor chileno posee una amplia oferta de productos en términos de tamaños de granos, orígenes geográficos, características culinarias y usos potenciales.

Los arroces Grado 1 y Grado 2 son los productos con mayor nivel de ventas, pudiendo alcanzar más de un 80 %, seguido desde lejos por el arroz pregraneado o parbolizado y los arroces preparados (Lara, 2017). En cuanto a los precios de venta promedio, los mayores valores se observan en las categorías premium y preparados, lo que se debe a que los productos premium suelen ser importados y con características y usos exclusivos, en comparación a los arroces preparados. Por otra parte, los arroces Grado 1 poseen un precio superior a los arroces Grado 2, lo que refleja la valorización de la relación cantidad de granos enteros y calidad.

En relación al origen de los productos, existe una leve predominancia de los productos nacionales, los cuales concentran un 58 % de las unidades vendidas, cifra que alcanza a más del 90% cuando se considera el Grado 1, arroz largo ancho nacional. En el caso del arroz Grado 2, las ventas alcanzan casi un 50 % en los arroces importados y nacionales. En los arroces pregraneados e integrales, la concentración es del 100 % en importados y nacionales respectivamente, debido a que toda la oferta de arroces integrales proviene de producción nacional y, a su vez, toda la oferta de productos pregraneados es de origen extranjero (Lara, 2017).

El consumo per cápita aparente de arroz en el país ha pasado, entre 2003 y 2013, de 10 kg por persona al año, a 14,2 kg, con un promedio de 11 kg por persona año (Figura 34) y con una frecuencia de preparación de arroz de tres a cuatro veces por semana. Este nivel de consumo es similar a U.S.A. y a algunos países europeos, y muy inferior a otros países como Perú, Colombia y Paraguay que superan los 50 kg por persona año (ODEPA, 2014).



Fuente: ODEPA, 2014.

Figura 34. Consumo per cápita aparente de arroz y otros alimentos en Chile, entre los años 2003 y 2013.

En el país, la comparación del consumo de arroz con otras especies como trigo y papa, indica que su consumo es bajo. Sin embargo, es muy superior al consumo de todas las legumbres, pero bastante menor que el pan y las papas. Por lo tanto, existe una oportunidad para aumentar el consumo del arroz, promoviendo algunas de sus propiedades como la ausencia de gluten, aporte de vitaminas y sus diversas formas de consumo y baja carga de pesticidas en su producción, ya que durante su cultivo no presenta enfermedades ni plagas importantes (Foto 1).

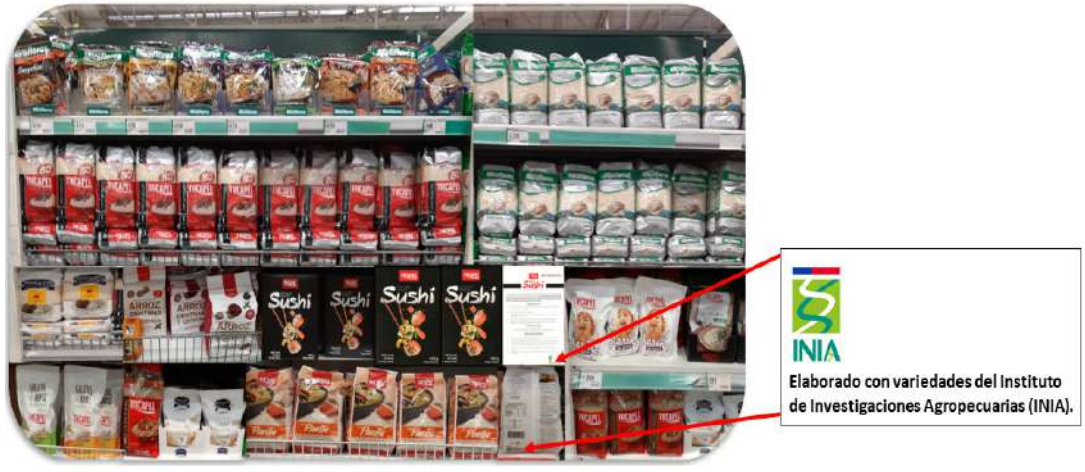
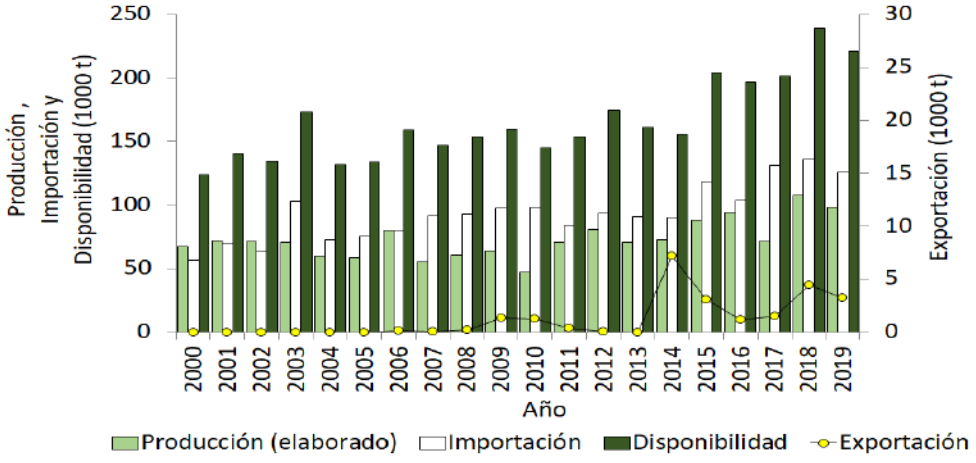


Foto 1. Arroz largo-ancho elaborados con variedades INIA y arroz especial de sushi y paella producido con la variedad ´Platino-INIA`.

Un estudio realizado sobre la valoración del arroz comercializado en un par de cadenas de supermercados del país, indicó que: a) la decisión de la compra semanal del arroz está influenciada por los precios (dependiendo del producto), pero en mayor medida al tipo de grano y a las marcas comerciales; b) existe una fidelidad de los consumidores a los fabricantes del producto nacional y al producto de las variedades locales, de grano largo ancho; c) existe un interés de la industria nacional por mantener relaciones de largo plazo con los agricultores y con organismos públicos que realizan investigación y desarrollo en el rubro; d) existe la entrada de marcas propias del ´retail` y un interés por su posicionamiento en el mercado nacional; e) existe un significativo resultado económico para el distribuidor y para la industria dedicada al arroz; f) el arroz producido en el país presenta una mayor preferencia por parte de los consumidores y que el tener este producto en la oferta de las industrias genera importantes utilidades en la cadena agroindustrial; g) la exclusión del producto nacional de la venta en cada distribuidor (comercio minorista), genera un muy acotado desplazamiento de la demanda hacia los productos de origen importado, y la respuesta de las preferencias de los consumidores generaría una reducción del tamaño del mercado de este producto; h) la ausencia de la variedad nacional de arroz largo ancho en el mercado podría generar importantes pérdidas de utilidades en la industria y en las cadenas del comercio minorista (Espinoza, 2018).

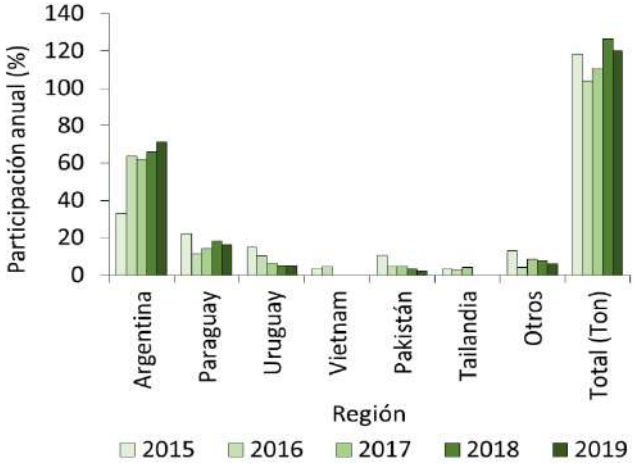
A pesar de esta buena valorización del arroz nacional por parte de los consumidores chilenos, durante este período, la producción nacional fue siempre menor al de las importaciones, llegando a representar más de un 55 % de la disponibilidad aparente para el consumo interno. Debido a esta situación, el país ha debido importar arroz para satisfacer las necesidades de la población, aunque se han exportado cantidades pequeñas debido a condiciones favorables en el mercado internacional (Figura 35). En este sentido, la empresa Tucapel S.A. sostiene haberse abierto al mercado internacional en los últimos años y que su oferta exportadora está constituida por diversas líneas de productos, con mayor valor agregado como los arroces preparados, Vero Risottos Premium, arroces integrales preparados y especialidades como el arroz para Sushi y para Paella (www.empresastucapel.cl, 2019).



Fuente: COTRISA; García y Laval, 2020. *Rendimiento industrial 50-56%.

Figura 35. Producción nacional (1.000 t), disponibilidad (1.000 t), importaciones (1.000 t) y exportaciones de arroz elaborado (1.000 t), entre los años 2000 y 2019.

Los principales países vendedores de arroz a Chile en los últimos años fueron Argentina, Paraguay, Uruguay, Vietnam, Pakistán y Tailandia (Figura 36).

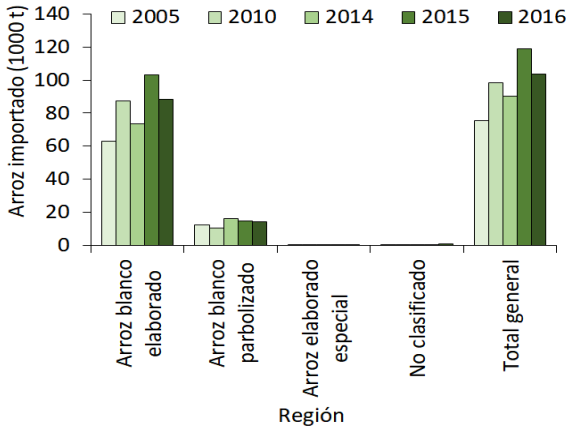


Fuente: COTRISA; García y Laval, 2020.

Figura 36. Participación anual (%) de los principales países exportadores de arroz a Chile, entre los años 2015 y 2019.

En relación al arroz importado, conviene mencionar que la industria no importa arroz paddy y tampoco adquiere valores relevantes de arroz integral, por lo cual un alto porcentaje de los volúmenes importados son productos de arroz elaborado que no requieren procesos industriales adicionales, salvo los asociados a la distribución. Dentro de estas importaciones existe un pequeño porcentaje de arroz partido, que no se destinan al consumo como producto de arroz, sino a la elaboración de la cerveza (Inostroza y Farías, 2017).

La mayor cantidad de arroz importado fue el arroz blanco elaborado, seguido por el arroz blanco parbolizado, los arroces elaborados especiales y otros productos no clasificados (Figura 37) (Espinoza y Farías, 2017).



Fuente: Espinoza y Farías, 2017.

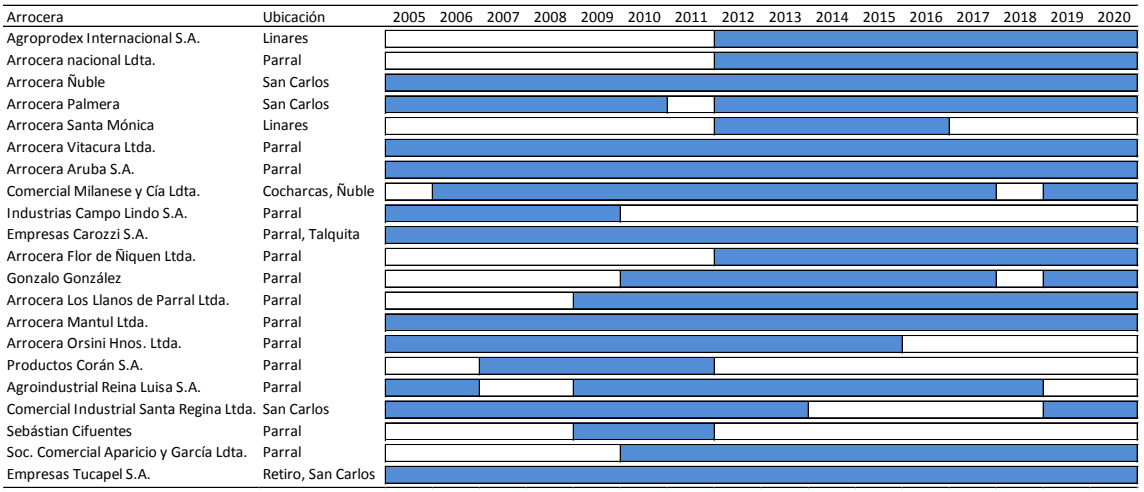
Figura 37. Clases de arroz elaborado importado (1.000 t), en los años 2005, 2010, 2014, 2015 y 2016.
* Se excluyeron los productos destinados a la alimentación animal.

El arroz blanco elaborado incluye a los arroces con menos de 5 % de grano partido, entre 5 y 15 % de grano partido. Esta clase de arroz complementa a la producción nacional de grano blanco elaborado. En relación al arroz parbolizado, el volumen importado corresponde al 100 %

disponible en el mercado nacional, ya que en el país no se produce este tipo de arroz. En la clase de arroces especiales, se incluyen arroces de nicho y ´gourmet` como el basmati, arborio, jazmín, y carnaroli (Espinoza y Farías, 2017).

Es importante señalar que en los últimos años se ha producido la irrupción de empresas dedicadas a la importación de arroz que comienzan a ganar volumen, en desmedro de las empresas procesadoras que eran las que principalmente han efectuado la importación de este producto en Chile. Los antecedentes indican que las empresas del retail, prácticamente no participan en la importación directa de productos, lo que denota que prefieren adquirirlo a las empresas importadoras distribuidoras, o bien a las empresas manufactureras nacionales que también disponen de esos productos en su oferta. Las empresas importadoras/distribuidoras son las encargadas de importar, distribuir y también envasar el producto. Algunas de las empresas procesadoras actúan también como importadores y distribuidores mayoristas (Espinoza y Farías, 2017; Espinoza, 2018). En el año 2016, las principales empresas importadoras de arroz fueron Empresas Tucapel S.A., con un 22 %, Agrocommerce S.A. (13 %), Empresas Carozzi, S.A. (10 %), CV Trading S.A., (9 %), Bunge Chile SPA (9 %); Comercial Chacao (6 %), Sociedad Distribuidora de Productos Caban Ldta. (4 %); Comercializadora Vito Ltda. (4,0 %), y otras 18 empresas (Espinoza y Farías, 2017). Algunas de estas empresas se han mantenido por largo tiempo en el mercado y otras han participado sólo en un corto período (Cuadro 5).

Cuadro 5. Presencia de industrias molineras en el mercado nacional. 2005-2018.



Fuente: : https://www.cotrisa.cl/. Barra en azul = potencial comprador y barra en blanco = sin información.

Finalmente, la cadena productiva cuenta con la participación del Ministerio de Agricultura, cuya actividad coordinadora se realizada a través de la Subsecretaría de Agricultura y sus instituciones: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA; Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA; Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP; Servicio Agrícola y Ganadero, SAG; Fundación para Innovación Agraria, FIA; Centro de Información de Recursos naturales, CIREN; Comisión Nacional de Riego, CNR; Fundación de Comunicaciones, Capacitación y Cultura del Agro, FUCOA; y la Agencia Chilena para la Inocuidad y Calidad Alimentaria, ACHIPIA; e instituciones y servicios relacionados como el Comité de Seguros del Agro, Agroseguros; Agro Atiende; Comercializadora de Trigo S.A., COTRISA; PROCHILE; Corporación de Fomento de la Productividad, CORFO; y BANCO ESTADO (https://www.minagri.gob.cl/).

La actividad coordinadora del Ministerio de Agricultura se desarrolla directamente a través de la Comisión Nacional del Arroz, que fue creada en 1980, por el Decreto N°42, 2012 del Ministerio de

Agricultura, 2002 y que actúa como un ente asesor en materias relacionadas con la formulación y elaboración de políticas de producción y comercialización del arroz, y donde participan organismos y empresas del sector público y privado (Danty, 2013).

La Comisión Nacional del Arroz ha asumido diferentes funciones desde su creación. Antes del año 1993, se convocaba por asuntos coyunturales, con una o dos reuniones al año. Entre 1993 y el año 2002, su trabajo se focalizó en la reconversión arrocera y programa de mejoramiento de arroz. Entre el año 2002 y el año 2006 su principal preocupación fue el etiquetado de los productos y se elaboraron los primeros estudios de atributos para impulsar una estrategia de diferenciación del arroz. Después del año 2006, se ha focalizado en la transparencia del mercado y en la innovación, y se crearon subcomisiones temáticas como la de innovación, comercialización y la mesa campesina (Danty, 2013).

Los principales resultados de la Comisión Nacional del Arroz se pueden resumir en: a) participación activa en la fijación de normas oficiales (INN, 1989; 2003a; 2003b); b) regulación del etiquetado del producto nacional para diferenciarlo del importado, del largo-ancho y del largo-fino; c) establecimiento del indicador del Costo Alternativo de Importación (CAI), calculado por ODEPA, usado como referencia del precio del arroz pagado a los agricultores; d) definición de la Estrategia de Innovación, 2009 y 2017; y e) apoyo al ingreso de Chile al Consorcio del Fondo Latinoamericano de Arroz de Riego, FLAR (Danty, 2013).

Factores limitantes en la cadena de producción de arroz

A pesar de los avances tecnológicos logrados en la producción de arroz, aún existen algunos problemas importantes a resolver (Paredes et al., 2013; 2015; FIA, 2009; 2017). De acuerdo a la Agenda de innovación de la Cadena del Arroz, los factores limitantes se pueden agrupar en cuatro áreas de trabajo (FIA, 2017).

- Ámbito productivo y tecnológico: deficiente disponibilidad y uso de maquinaria, inadecuado control de malezas, oferta limitada de variedades más precoces, necesidad de ajustar la recomendación de fertilizantes, desconocimiento de las implicancias ambientales asociadas al cultivo.
- Ámbito de la gestión y asociatividad: dificultad de contar con mano de obra e insuficiencia en la gestión de la unidad productiva.
- Ámbito de la formación y capacitación: falta de profesionales y técnicos especializados, e instancias de formación y capacitación.
- Ámbito de la extensión y difusión tecnológica: insuficiente información técnica, mejorar las metodologías de la difusión de los conocimientos y prácticas de validación de la tecnología, para satisfacer la demanda existente.

Desarrollo institucional y educacional agrícola relacionado con el cultivo del arroz

En 1967, la Ley N° 16.640 transformó a la Dirección General de Agricultura y Pesca del Ministerio de Agricultura en una persona jurídica de derecho público denominada Servicio Agrícola y Ganadero, SAG. Las normas y objetivos que rigen al SAG se establecen en la Ley N° 18.755 de 1989, modificada por la Ley N° 19.283 de 1994 **(**www.sag.gob.cl**).** En 1975, se crea la Comisión Nacional de Riego, persona jurídica cuyo principal objetivo es asegurar el incremento y mejoramiento de la superficie regada del país (www.cnr.gob.cl). La Oficina de Estudios y Políticas Agrarias ODEPA, es un servicio público centralizado, dependiente del Presidente de la República, a través del Ministerio de Agricultura, creada mediante la Ley N° 19.147, que fuera publicada en el Diario Oficial del 21 de julio de 1992 (www.odepa.gob.cl). Su origen se remonta a la Oficina de Presupuesto

que se transforma en la Oficina de Planificación Agrícola y, posteriormente, en la actual Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. En 1981, el Ministerio de Justicia crea el Fondo de Investigación Agropecuaria, con el objetivo de promocionar y fomentar la investigación agrícola, pecuaria, forestal y acuícola a través del financiamiento total o parcial de proyectos de investigación. Luego de una modificación a sus estatutos, se otorgó la denominación de Fundación para la Innovación Agraria, FIA, en el año 1996 (www.fia.cl). En 1982, se crea la Fundación de Comunicaciones, Capacitación y Cultura del Agro, FUCOA, como una entidad sin fines de lucro (www.minagri.gob.cl). El 2005 se crea la Comisión Asesora Presidencial denominada Agencia Chilena para la Inocuidad Alimentaria, ACHIPIA, dependiente del Ministerio Secretaría General de la Presidencia y el 2011 pasa a depender del Ministerio de Agricultura (www.achipia.gob.cl). El año 2000 se crea el Servicio por el Consejo de la Corporación de Fomento (CORFO), con la finalidad de desarrollar y promover los Seguros para el Agro, y administrar un Subsidio del Estado para el copago de las Primas de los Seguros Agropecuarios. El año 2016, se crea la Comisión Asesora Nacional de Gestión Integral de Riesgos Agropecuarios, cuyo objetivo es asesorar técnicamente al ministro de la cartera en la formulación de una estrategia ministerial para la gestión integral de los riesgos que afectan a la actividad silvoagropecuaria (www.minagri.gob.cl).

En la educación agrícola se distinguen tres tipos de instituciones: universidades, institutos y centros de formación técnica y liceos agrícolas.

Universidades, que otorgan grados de licenciados, títulos de Ingenieros agrónomos y/o grados académicos.

En 1981, se crea el Instituto de Agronomía de la Universidad de Tarapacá que tuvo su origen en el año 1963 con la creación del Laboratorio de Investigación y Control de Plagas de la Universidad del Norte. El Instituto de Agronomía se transformó en la Facultad de Agronomía en el año 1998 y en la Facultad de Ciencias Agronómicas en el año 2006 (www.uta.cl). En 1982 se crea la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de la Frontera (www.ufro.cl), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Talca en 1983, dando paso en 1987 a la Escuela de Agronomía (www.agronomia.utalca.cl). Recientemente, se han incorporado otras universidades en esta misma dinámica, como la Universidad Mayor, Santo Tomás, de las Américas, Católica del Maule, Católica de Temuco, de Viña del Mar, Adventista de Chile, Arturo Prat, Magallanes, O´Higgins y Aysén (www.ingenierosagronomos.cl). Las universidades que han realizado investigación en el arroz son: Pontificia Universidad Católica, Universidad de Chile, Universidad de Talca, Universidad de Concepción, Universidad de Santiago, Universidad Austral, Universidad Federico Santa María.

Universidades, Centros o Institutos de Formación Técnica que otorgan títulos de técnico de nivel superior

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Universidad Católica de la Santísima de Concepción, Universidad Santo Tomás, Instituto Profesional Agrario Adolfo Matthei, Centro de Formación Técnica Juan Bohon, del Medio Ambiente Prodata, DUOC-UC, INACAP (www.cursosycarreras.cl).

Liceos agrícolas que otorgan el título de técnicos de nivel medio. El Instituto de Educación Rural (IER) perteneciente a la Fundación Educacional de derecho privado, cuyo origen se remonta al año 1954 (www.ier.cl) y a la Corporación del Desarrollo Social del Sector Rural, CODESSER, perteneciente a la Sociedad Nacional de Agricultura, SNA, creada en el año 1976, cuando el Ministerio de Educación traspasa algunos de sus colegios a esta Corporación (www.codesser.cl).

REFERENCIAS

Acuña, D., García, A., Laval, E. 2018. Mayor sustentabilidad en el sector arrocero en Chile: desafío para la cadena. Departamento de Análisis de Mercado y Política Sectorial. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

Aldunate, P. 1983. Antecedentes de producción y precios, mercado internacional y nacional. p. 1-8. En Análisis técnico económico del cultivo del arroz. Programa de seminarios, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 79p.

Aldunate, P., Pérez, R., Poblete, R., et al. 1984. Situación del sector arrocero y nuevas alternativas de industrialización. División frutas y hortalizas. Fundación Chile. Pub. Téc. N°4. 26p.

Alvarado, R. 1990. Dosis de semilla en Arroz. Efecto de la calidad de la semilla y de algunos factores de manejo. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 44:15-18.

Alvarado, R., Gallardo, I. 1994. Influencia de la época de corte del agua al arroz (*Oryza sativa* L.) sobre el rendimiento, humedad del grano y calidad industrial. Agric. Téc. (Chile) 54:238-242.

Alvarado, R., Grau, P. 1991. Mejoramiento del arroz en Chile por tolerancia a frío. p. 105-114. En Puignau, J. (Ed.) Diálogo XXXIII. Mejoramiento de arroz. Reunión sobre mejoramiento de arroz en el Cono Sur. 17-21 Julio, 1989. IICA. PROCISUR. Montevideo, Uruguay.

Alvarado, R., Grau, P., Martínez, C., et al. 1993. Buli-INIA, variedad de arroz de grano fino. Agric. Téc. (Chile) 53:89-90.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 1995. Riego. p. 22-24. In Manual de producción de arroz. Programa de reconversión de suelos degradados. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2005. Ámbar-INIA. Nuevo cultivar de arroz de grano corto y muy bajo en contenido de amilosa. Agric. Téc. 65:101-104.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2007. Variedades, siembra, semilla certificada, dosis de semilla y época de siembra. p. 21-37. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, Manejo Tecnológico. Boletín INIA N°62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2014. Historia del cultivo del arroz en Chile. Chilean J. Agric. Anim. Sci. 30:127-138.

Alvarado, R., Hernaíz, S., Gómez, A., et al. 1997. Brillante-INIA, nueva variedad de arroz con grano largo y translúcido. Agric. Téc. (Chile) 57:221-222.

Alvarado, R., Lobos, C. 1986. Calidad del arroz. Caracterización de tres variedades. Agric. Téc. (Chile) 46:9-14.

Alvarado, R., Madariaga, R., Gómez, A. 1991. Pudrición del tallo en arroz: respuesta varietal. Inv. Progr. Agrop., INIA Quilamapu, (Chile) 50:32-35.

Alvarado, R., Ormeño, J., Cisterna, C. 1985. Efecto de la fertilización nitrogenada y el control de las malezas en el rendimiento de arroz (*Oryza sativa* L.). Agric. Téc. (Chile) 45:9-14.

Alvarado, R., Pedreros, A. 1991. Presencia de arroz rojo en Chile. Agric. Téc. (Chile) 51:374-377.

Alvarado, R., Pino, A. 1979. Arroz Ñiquén-INIA, una variedad precoz. Informativo N°6. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Estación Experimental Quilamapu, Chillán, Chile. 2p.

Alvarado, R., Pedreros, A. 2007. Arroz rojo, un problema actual. p. 127-136. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, Manejo Tecnológico. Boletín INIA N°62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Pino, A. 1982. Arroz Diamante-INIA. Agric. Téc. (Chile) 42:253.

Anónimo. 1952. Volumen y valor de nuestras exportaciones de arroz. El Campesino 83(1):9-10.

Anónimo. 1959. La producción agrícola y sus precios en el año 1957-1958. El Campesino 90:19.

Anónimo. 1962. Un análisis sobre la producción de arroz en siete años. El Campesino 93(12):20-21.

Anríquez, C. 1934. El cultivo del arroz y sus posibilidades en Chile. 204 p. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Anríquez, E., Zepeda, J. 1962. La siembra aérea del trébol en los rastrojos de arroz. El Campesino 93(7):39-40.

Artacho, P., Meza, F., Alcalde, J. 2011. Evaluation of the ORYZA2000 rice growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated mediterranean environment. Chil. J. Agric. Res. 71:23-33.

Astorga, C. 1944. Elaboración industrial del arroz Nacional. 120 p. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Bangert, E. 1953. Modernos tratamientos del Arroz. El Campesino 84(3):33.

Becerra, V., Donoso, G., Hube, S., et al. 2020. Disminución de uso de agua y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): Producción más eficiente y sostenible de arroz en Chile. Rev. Campo Tecnol. Abril-mayo: 21-22.

Becerra, V., Hube, S., Donoso, G. 2018. Capacity-building training in Chile. p. 8-11. In Nagata, A. (ed.) Capacity building on management technologies for climate smart rice cultivation in the Southeast Asian and Latin American rice sector. Bangkok, Thailand. 10-12 October 2018; Parral, Chile. 15-16 November 2018. APEC Agricultural Technical Cooperation Working Group. APEC Project: ATC 01 2017A. Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC.

Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. 2019. Arroz sustentable: Sistema de producción de arroz Clearfield. Boletín INIA N°397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Becerra, V., Paredes, M., Ferreira, M., et al. 2017. Assessment of the genetic diversity and population structure in temperate japonica rice germplasm used in breeding in Chile, with SSR markers. Chil. J. Agric. Res. 77:15-26.

Becerra, V., Paredes, M., Gutiérrez, E., et al. 2015a. Genetic diversity, identification, and certification of Chilean rice varieties using molecular markers. Chil. J. Agric. Res. 75:267-274.

Becerra, V., Paredes, M., Rojo, C., et al. 2015b. Germoplasma de arroz utilizado en el país. p. 22-25. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. 100p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Brevis, O. 1963.Influencia de la variedad y época de cosecha en el rendimiento industrial del arroz *Oryza sativa* L. 215 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.

Cabas, P. 2012. Tolerancia al frío en genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) al estado de plántula. 34 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de agronomía, Chillán, Chile.

Cordero, K., Hernaíz, Z., Saavedra, F., et al. 2010. Zafiro INIA. Arroz, grano largo, alto rendimiento de campo y gran calidad industrial. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Cordero, K., Hernaíz, Z., Saavedra, F., et al. 2011a. Cuarzo-INIA. Nueva variedad de arroz grano largo ancho. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Cordero, K., Saavedra, F., Hidalgo, S. 2011b. Manual de procedimientos para la medición de la calidad industrial del arroz en Chile. Boletín INIA N°230. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Corporación de Ventas de Salitre y Yodo de Chile. 1955. Arroz (*Oryza sativa*). p.170-174. En Agenda del Salitre. 6ª ed. Nitrato Natural de Chile. Santiago, Chile.

Correa, L. 1938. Agricultura chilena. Imprenta Nacimiento. Santiago, Chile.

Danty, J. 2013. Chile: La experiencia de la Comisión nacional del arroz. p.67-71. En Politicas para la agricultura en América Latina y el Caribe: competitividad, sostenibilidad e inclusión social. CEPAL, Santiago, Chile. LC/L3646.

Dinator, R. 2015. O´Higgins huaso. Instituto O´Higginiano. https://www.institutoohigginiano.cl/imágenes/PDF/O´higgins-huaso.pdf.

Dirección General de Estadísticas. 1931. Resultados del X Censo de la población efectuado el 27 de noviembre de 1930 y estadísticas comparadas con Censos anteriores. Dirección General de Estadísticas, Santiago, Chile.

Dirección General de Estadísticas. 1933. Censo Agropecuario 1929-30. Soc. Imp. y Lit. Universo, Santiago, Chile.

Dirección General de Estadísticas. 1938. Agricultura: Censo 1935-1936. Imp. Universo, Santiago, Chile.

Donoso, G., Becerra, V., Uribe, H., et al. 2019. Nuevas herramientas para mejorar la gestión del agua en el sector arrocero de Chile. Tierra Adentro 111:41-46.

Donoso, G., Cabas, P., Paredes, M., et al. 2015a. Cold tolerance evaluation of temperate rice (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*) genotypes at the seedling stage. Gayana Bot. 72:1-13.

Donoso, G., Leyton, M., Paredes, M., et al. 2014. Relative expression of genes related with cold tolerance in temperate rice at the seedling stage. Afr. J. Biotechnol. 13:2506-2512.

Donoso, G., Paredes, A. 2013. Efecto del clima en el rendimiento del arroz. En Programa de arroz INIA: transfiriendo ciencia y tecnología para fortalecer la competitividad del sector. Tierra Adentro, Ed. Especial. 104:7-10.

Donoso, G., Paredes, A. 2015a. Efecto de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz. p. 18-21. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Donoso, G., Paredes, M., Arbiza, O., et al. 2013. Cold tolerance evaluation of Chilean rice genotypes at germination stage. Chil. J. Agric. Res.73:3-8.

Donoso, G., Paredes, M., Uribe, H., et al. 2015b. Manejo del agua: alcances y desafíos. p. 59-61. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas Agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Elgueta, L. 1955. Organización de la cooperativa de productores de arroz de San Carlos. Simiente 25:80-81.

Espinoza, A. 2018. Valoración de productos de arroz de variedad desarrollada en chile y su efecto en las ganancias del retail y empresas productoras. 47 p. Tesis Magíster en economía aplicada. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial, Santiago, Chile.

Espinoza, A., Farías, C. 2017. La cadena del arroz en Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

Fedearroz. 2019. Más arroz con menos emisiones y mejor consumo de agua. Arroz 67 (538):37-45.

FIA. 2009. Agenda de Innovación Agraria para la cadena del arroz en Chile. Fundación para la Innovación Agraria (FIA); Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

FIA. 2017. Agenda de Innovación Agraria para la cadena del arroz en Chile. Fundación para la Innovación Agraria (FIA); Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile. France, A., Alvarado, R. 1985. Pudrición del tallo: nueva enfermedad del arroz en Chile. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 23:12-14.

Fundación Chile. 1983. Situación del sector arrocero y alternativas de industrialización. División frutas y hortalizas. Publicación Técnica N° 4. Santiago, Chile. 26p.

Fundación Chile. 2015. Desarrollo de un estudio para el desarrollo de un protocolo de agricultura sustentable. Fundación Chile, Santiago, Chile.

Fundación Chile. 2017. Estudio de estándares de sustentabilidad para el sector arrocero. Fundación Chile, Santiago, Chile.

Garcés, P. 1945. El cultivo de arroz. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

García, A., Laval, E. 2020. Arroz p. 44-60. En Cereales: producción, precios y comercio exterior de trigo, maíz y arroz. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

Gay, C. 1846. Arroz. p. 91-92. En Historia física y política de Chile. Agricultura. Cap. I. De los cultivos. Museo de Historia Natural, Santiago. MDCCCLXV. 443p.

Gerding, M. 1989. Insectos en arroz. En Alvarado R. (ed.) Manual de producción de arroz VII región. Serie Quilamapu N°20. p. 77-78. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Gerding, M., Grau, P. 1988. Cuncunilla en arroz (*Pseudaleti impucta*). Inv. y Progr. Agrop., INIA Quilamapu (Chile) 38:34-36.

Gil, A. 2012. Dos jóvenes japoneses padres indiscutidos del arroz en Chile. Dedal de Oro 60:12 http://www.dedaldeoro.cl/ed60-20-21_jovenes-japoneses.html.

Gomien, R. 1951. La mecanización en la cosecha de arroz. El Campesino 82(9):64.

González, J. 2018. El cultivo del arroz. p. 663-669. En Historia de Linares. Municipalidad de Linares, Academia Chilena de la Historia.

González, J., Parada, J., Paredes, M. 2013. Primer concurso de producción de arroz en Chile. En Programa de arroz INIA: transfiriendo ciencia y tecnología para fortalecer la competitividad del sector. Tierra Adentro, Ed. Especial 104:84-88.

Grau, P., Cisternas, C. 1986a. Importancia de una adecuada nivelación en los campos de arroz. Inv. Progr. Agrop., INIA Quilamapu (Chile) 28:3-6.

Grau, P., Cisternas, C. 1986b. Características de las variedades comerciales de arroz. Inv. Prog. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 41:12-14.

Gutiérrez, J. 2019. Efecto del riego intermitente sobre el cultivo del arroz. 42 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Adventista de Chile. Facultad de Ingeniería y Agronegocios, Escuela de Agronomía, Chillán, Chile.

Hartard, M. 1943. Arroz nacional. El Campesino 74 (1): 14-18.

Hartard, M. 1948. Siembras y cosechas de arroz. El Campesino 79(12):27.

Hartard, M. 1951. Siembras y cosechas del arroz. El Campesino 82(8):41-43.

Hartard, M. 1952. Siembras y cosechas de arroz. El Campesino 83(7):111.

Hartard, M. 1954. Nuestros cultivos y cosechas de arroz. El Campesino 85(5):10.

Henríquez, R., Henríquez, G., Sepúlveda, D., et al. 2018. Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas de arroz en Chile. Serie estudios para la innovación. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.

Hernaíz, S., Alvarado, R. 2007a. Manejo del agua en el arrozal. p. 49-57. En Alvarado R. (ed.) Arroz, Manejo tecnológico. Boletín INIA N° 162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hernaíz, S., Alvarado, R. 2007b. Sistematización (adecuación) de los suelos en el campo arrocero. p. 69-86. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, Manejo Tecnológico. Boletín INIA N°62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hernaíz, S., Alvarado, R. Chatel, M., et al. 2005. Improving irrigated rice populations for the temperate climate in Chile. p. 129-143. In Guimaraes, E. (ed.) Population improvement: A way of exploiting the rice genetic resources of Latin America. FAO, Rome, Italy.

Hirzel, J. 2007. Nutrición y fertilización del cultivo de arroz. p. 87-103. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, Manejo Tecnológico. Boletín N°62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hirzel, J. 2013. Uso de enmiendas orgánicas como fuente de fertilización alternativa en el cultivo de arroz. En Programa de arroz INIA: transfiriendo ciencia y tecnología para fortalecer la competitividad del sector. Tierra Adentro, Ed. Especial. 104:22-26.

Hirzel, J. 2015. Nuevos antecedentes en la fertilización nitrogenada. p. 43-50. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hirzel, J., Cordero, K. 2011. Fertilización del cultivo del arroz. p. 167-196. En Hirzel, J. (ed.) Fertilización de cultivos en Chile. Colección libros INIA N°28. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hirzel, J., Cordero, K., Fernández, C., et al. 2012. Soil potentially mineralizable nitrogen and its relation to rice production and nitrogen needs in two paddy rice soils of Chile. J. Plant Nutr. (Japan) 35:396-412.

Hirzel, J., Paredes, M., Becerra, V., et al. 2019. Nutrición y fertilización del arroz de la variedad Digua Cl en siembra directa. p. 36-44. En Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. (eds.) Arroz sustentable: Sistema de producción de arroz Clearfield. Boletín INIA N° 397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hirzel, J., Paredes, M., Becerra, V., et al. 2020. Response of direct seeded rice to increasing rates of nitrogen, phosphorus, and potassium in two paddy rice soils. Chil. J. Agric. Res. 80:263-273.

Hirzel, J., Pedreros, A., Cordero, K. 2011. Efecto de dosis de nitrógeno y parcialización de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de grano y componentes de rendimiento en arroz. Chil. J. Agric. Res. 71:437-444.

Hirzel, J., Rodríguez, F. 2013. Increasing nitrogen rates in rice and its effect on plant nutrient composition and nitrogen apparent recovery. Chil. J. Agric. Res. 73:385-390.

Hube, S., Alfaro, M., Ramírez, L., et al. 2015. Contribución del cultivo de arroz al cambio climático. p. 4-7. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

INE. 1977. Arroz. p. 50. En VI Censo nacional agropecuario, 1975-1976. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Santiago, Chile.

INE. 2007. VII Censo nacional agropecuario y forestal. 2007. Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Santiago, Chile.

INE, ODEPA. 1979. Encuesta nacional Agropecuaria de noviembre 1980. Año agrícola 1980-81. Programa de Estadísticas Agropecuarias. Ministerio de Economía y Fomento y Reconstrucción. Instituto Nacional de Estadísticas. República de Chile. 7p.

INE, ODEPA. 1980. Encuesta nacional Agropecuaria de mayo 1979. Programa de Estadísticas Agropecuarias. República de Chile. 15p.

INIA. 2014. Qué es el INIA: Origen y actualidad. p. 17-20. En 50 años. INIA 1964-2014. Liderando el desarrollo de la agricultura de Chile. 364p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

INN. 1989. Arroz con cáscara-métodos de ensayo y análisis. Norma chilena oficial NCh 1375.Of88. Primera edición 1989, Reimpresión, 1999. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2003a. Arroz con cáscara (arroz paddy)-requisitos. Norma chilena oficial NCh 2033.Of2003. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2003b. Arroz pulido-terminología, clasificación y requisitos generales. Norma chilena oficial NCh 1359.Of2003. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

Inostroza, A., Farías, C. 2017. La cadena del arroz en Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 22p.

Keller, C. 1956. Revolución en la agricultura. Zigzag, Santiago, Chile. 541p.

Koller, E. 1958. El cultivo del arroz en la provincia de Ñuble y su terminología. p. 87-103. Boletín de Filología. Universidad de Chile. Tomo IX. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.

Lara, N. 2017. Inserción y crecimiento de las marcas propias en el mercado del arroz. Análisis en forma reducida. 40 p. Tesis magíster en economía aplicada. Universidad de Chile , Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial, Santiago, Chile.

Madariaga, R., Morales, X., Alvarado, R. 1999. *Rhizoctonia oryzae-sativae* (Sawada) Mordue, agente causal de la pudrición o mancha agregada de la vaina del arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile. Agric. Téc. (Chile) 59:77-84.

Maldonado, I. 1986. Trazado de pretiles en siembra de arroz. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 29:22-25.

Maldonado, I., Alvarado, R. 1982. Algunos aspectos del manejo del agua en el arroz. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 13:20-23.

Mardones, J., Cox, R. 1942. La alimentación en Chile. Estudios del Consejo Nacional de Alimentación. Imprenta Universitaria, Santiago, Chile.

Martínez, F., Muchnik, E. 1983. Arroz. p. 1-34. En Comercialización de cultivos industriales: trigo, maíz, arroz y raps/maravilla, período 1976-1982. Departamento de Economía Agraria, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Ministerio de Agricultura. 1970. Producción Agropecuaria. Indicadores Agroeconómicos. Publicación N°4. Oficina de Planificación Agrícola (ODEPA); Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Santiago, Chile. p. 6, 54-56; 117-120.

Morales, F. 2002. Evolución de los cultivos anuales en el período 1965-1988. Memoria de Título-Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Agronomía, Universidad de Chile. 162p.

Morales, A. 2015. Reseña histórica de Parral. http://www.parral.cl/parral--nuestra-historia.html.

ODEPA. 1976. Chile: Estadísticas agropecuarias 1965-1974. Oficina de Planificación Agrícola (ODEPA), Ministerio de Agricultura. República de Chile. 379p.

ODEPA. 1988. Estadísticas agropecuarias 1975-1987. Oficina de Planificación Agrícola. Ministerio de Agricultura. República de Chile. 622p.

ODEPA. 2014. Evolución del consumo aparente de los principales alimentos en Chile. Oficina de Estudio y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

ODEPA. 2020a. Información nacional de superficie sembrada, producción y rendimientos anuales. https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas.

ODEPA. 2020b. Información regional de superficie sembrada, producción y rendimientos anuales. https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas.

Olate, H. 1950. Industria del arroz en Chile y sus proyecciones económicas. Memoria de prueba para optar al grado de Licenciado Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. Universidad de Chile. Memorias 11:161-222.

Opazo, R. 1922. Arroz (*Oryza sativa* L.). p. 159. En Agricultura. Monografía cultural de las diversas plantas agrícolas. II Parte. Imprenta Santiago, Santiago, Chile.

Opazo, R. 1939. Arroz (*Oryza sativa* L). p. 551-567. En Agricultura. Monografía cultural de las principales plantas agrícolas susceptibles de cultivarse en Chile. Tomo II. Talleres Gráficos La Nación S.A., Santiago, Chile.

Orrego, J. 2017. El ciclo arrocero. p. 182-183. En I. Municipalidad de Pelarco (ed.) Pelarco. Una comunidad, un pueblo…un mundo. Pelarco, Región del Maule, Chile.

Ortega, R., Belmar, C. 1990. Efecto de la fertilización fosfatada en variedades Diamante, Oro, Perla, Quella, de arroz. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 44:31-33.

Ortega, R., Madariaga, R., Alvarado, R. 1991. Pudrición del tallo en arroz: fertilización potásica. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 49:19-24.

Parada, J., Paredes, M. 2014. Agricultores arroceros obtienen rendimiento récord en Chile en Concurso Nacional de Producción. Tierra Adentro (Ed. Especial)104: 21-23.

Parada, J., Paredes, M., Becerra, V. 2013. Actividades de divulgación: Transfiriendo ciencia y tecnología al sector arrocero del país. En Programa de arroz INIA: transfiriendo ciencia y tecnología para fortalecer la competitividad del sector. Tierra Adentro, Ed. Especial 104:43-48.

Parada, J., Paredes, M., Becerra, V., et al. 2013. Validación de la tecnología INIA. En Programa de arroz INIA: transfiriendo ciencia y tecnología para fortalecer la competitividad del sector. Tierra Adentro, Ed. Especial 104:79-83.

Parada, J., Riquelme, J., Paredes, M. 2015. Siembra directa en arroz. p. 28-31. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2013. Programa de arroz INIA: aportes a la producción nacional. Tierra Adentro 104: 35-39.

Paredes, M., Becerra, G., Donoso, G., et al. 2015. Aportes tecnológicos de INIA al sector arrocero. p. 89-93. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2020. Digua CL. Nueva variedad de arroz grano largo ancho. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2015. Aportes tecnológicos de INIA al sector arrocero. p. 89-94. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín N° 306. 100p.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2016. Platino-INIA. Nueva variedad de arroz grano medio. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu. https://www.inia.cl/semillasinia/folletos-de-semillas/. Consulta octubre 2020.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2019. Digua Cl., primera variedad de arroz Clearfield para Chile. p.18-25. En Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. (eds.) Arroz sustentable: Sistema de producción de arroz Clearfield. Boletín INIA N°397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, Fondef, Empresa Tucapel S.A., Empresa Carozzi S.A., Chillán, Chile.

Pedreros, A., Alvarado, R. 1994. Efecto de la lámina de agua en el control del hualcacho (*Echinochloa* spp.) en el cultivo de arroz. Agric. Téc. (Chile) 54:112-117.

Pedreros, A., Kramm, V. 2007. Malezas en arroz. p. 105-126. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, Manejo Tecnológico. Boletín N°62. 179p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Quezada, C., Hernaíz, S., Sandoval, M., et al. 2013a. Nivelación láser y su efecto en el manejo del agua y régimen térmico del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). J. Agric. Anim. Sci. (Chile) 29:25-34.

Quezada, C., Hernaíz, S., Sandoval, M., et al. 2013b. Efecto de la nivelación láser en las propiedades físicas y químicas de un suelo Acuic Haploxeralfs. Chil. J. Agric. Anim. Sci. 29:65-72.

Quezada, C., Hernaíz, S., Stolpe, N., et al. 2011. Efectos del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz. Agro-Ciencia 27:105-115.

Quezada, C., Hernaíz, S., Vidal, I., et al. 2013c. Selection of rice genotypes (*Oryza sativa*) with high nitrogen agronomic efficiency in an Acuic Durixererts soil, central-southern Chile. Cien. Inv. Agr. 40:375-385.

Ramírez, E., K Bastías, K., Becerra, V., et al. 2019. Evaluation of the levels and absorption of arsenic in Chilean rice according to the agronomic management. 15th Rio Symposium on Atomic Spectrometry. Mendoza, Argentina.

Riquelme, J., Parada, J., Paredes, M., et al. 2015. Establecimiento del cultivo del arroz. p. 26-27. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. 100p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Rodríguez, J. 1951. Estudio del Arroz. Memoria para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Rojas, C., Alvarado, R. 1982. Fertilización nitrogenada y fosfatada en arroz en la región centro sur de Chile. Efecto sobre los rendimientos en grano. Agric. Téc. (Chile) 42:15-21.

Salvo, H., Paredes, M., Becerra, V. 2015. Desarrollo de una nueva variedad de arroz: Zafiro-INIA-Clearfield. p. 40-42. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

San Martín, J., Ramírez, C. 1983. Flora de malezas en arrozales de Chile Central. Cienc. Inv. Agr. 10:207-222.

Scarlato, G. 2000. La cadena agroindustrial del arroz en los países del Cono Sur. Chile. p. 48-51. En Trayectoria y demandas tecnológicas de las cadenas agroindustriales en el Mercosur ampliado-Cereales: Trigo, maíz, arroz. Serie Documentos N°2. 244p. Procisur, Bid, Montevideo, Uruguay.

Servicio Nacional de Estadísticas y Censos. 1955. Arroz. III Censo Nacional Agrícola y Ganadero. Tomo II y Tomo III. Servicio Nacional de Estadísticas y Censos, Santiago, Chile.

Silva, C. 1937. Cómo se cultiva el arroz. Información completa sobre siembra, cultivo y cosecha de arroz. Ediciones Ercilla, Santiago, Chile.

Sims, G. 1959. Esperanzas efectivas para el sembrador de arroz. Plan Chillán. Dirección General de Producción Agraria y Pesquera 12: 2-6.

Sims, G. 1960. Nuevas variedades de arroz para Chile. Estación Experimental Chillán. Departamento Investigaciones Agrícolas. Chillán, Chile. Cartilla N°2. 5p.

Sims, G. 1966. Esperanzas efectivas para el sembrador de arroz. Plan de Desarrollo Agrícola e Higiene Rural de Maule, Ñuble y Concepción. Plan Chillán. Año IV (12):2-6.

Sims, G. 1969. El cultivo del arroz. El Campesino 100:44-71.

Sims, G. 1983a. Técnicas en el cultivo del arroz. Chile Agrícola 85:270-272.

Sims, G. 1983b. Cultivo del arroz. p. 9-16. En Análisis técnico-económico del cultivo del arroz. Programa de Seminarios Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 79p.

Sims, G., Alvarado, R. 1972. Manual de Producción de Arroz. Servicio Agrícola y Ganadero, Central de Divulgación Técnica, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Quilamapu. Boletín Técnico N° 54. 127p.

Sotomayor, E. 1954. Ensayo comparativo de abonos en arroz. 50 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Subsecretaría de Agricultura. 2011. Convenio de cooperación entre el Ministerio de Agricultura, Federación gremial nacional de productores de arroz de Chile y la Federación gremial Nacional de arroceros de Chile para la participación de Chile en el Fondo Latinoamericano de Arroces de Riego. Res. Exenta N°497. Subsecretaría de Agricultura, Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Subsecretaría de Agricultura. 2014. Convenio de cooperación entre el Ministerio de Agricultura, la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, la Fundación para la Innovación Agraria, el Instituto de Desarrollo Agropecuario; el Instituto de Investigaciones Agroepcuarias, la Federación gremial nacional de productores de arroz de Chile y la Federación gremial Nacional de arroceros de Chile, la empresa Carozzi S.A., la empresa Tucapel, S.A. para la participación de Chile en el Fondo Latinoamericano de Arroces de Riego. Res. Exenta N°518. Subsecretaría de Agricultura, Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Theune, H. 1941. Estudio taxonómico de "nuestra semilla nacional de arroz". 109 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Tornero, S. 1872. Agricultura General. II parte. Primera División. Cap. I. p.213. Imprenta del Mercurio de Tornero y Letelier, Valparaíso, Chile.

Torrealba, S. 1956. El problema del arroz en Chile. 111 p. Memoria Ingeniero comercial. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Tucapel, 1963. Décimo novena memoria. Arrocera Tucapel S.A.C.I. Santiago, Chile.

Uribe, H. 1955. Ensayo de rendimiento de variedades de arroz. 42 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.

Uribe, H., Riquelme, F. 2015. Huella del agua en arroz. p. 62-66. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Valenzuela, J. 1956. Dosis de abonos nitrogenados y época de aplicación apropiada para el cultivo del arroz. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronmía, Santiago, Chile.

Villalobos, E. 1941. El cultivo del arroz y su importancia económica. 81 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronmía, Santiago, Chile.

Villalobos, S., Silva, O., Silva, F., et al. 2001. Arroz. p. 785-786. En Historia de Chile. Tomo 4. Editorial Universitaria. Salesianos S.A., Santiago, Chile.

Williams, E. 1957. Mejor utilización de los rastrojos de arroz con empastadas, sin deshacer los pretiles. Simiente 27:51.

Capítulo 13. Certificación de semilla de arroz en Chile

Patricio Ávila F.

La certificación de semillas surge en el mundo como respuesta a la necesidad de asegurar una alta calidad en semillas, ya que cualquier defecto en ellas afecta toda la cadena de producción de alimento.

En Chile, según lo consagra el Reglamento General de Semillas (DL 188/1978), el proceso de certificación de semillas es conducido por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), a través de su División de Semillas.

El objetivo de la certificación es garantizar, oficialmente, que la semilla producida bajo este esquema, cumple la totalidad de requisitos, estándares y procedimientos de control de calidad, contemplados en las Normas Generales y Específicas de Certificación.

En nuestro país la Ley de Semillas (DL 1764/1986) y su Reglamento (DL188/1978) establece dos clases de semillas: la corriente y la certificada.

Una particularidad de la industria arrocera nacional la constituye el hecho que la totalidad de la semilla que se comercializa por causas formales, corresponde a semilla certificada. Esta singularidad, pocas veces destacada, ofrece una ventaja, por cuanto asegura la disponibilidad de semilla que ha pasado por el control oficial de la certificación.

La certificación de semilla alude a un determinado esquema productivo, más que a un producto final. La razón de esto radica en que la producción de semilla es un proceso largo que involucra desde la mantención del germoplasma base de la variedad, pasando por varios ciclos de multiplicación, hasta llegar a la producción de semilla a escala comercial. Entonces, si sólo se esperase hasta finalizar el proceso para controlar el producto resultante (semilla comercial), se correría el riesgo de que, si el producto final no reuniese los requisitos de calidad, no sólo se perdería el producto final, sino que se estaría perdiendo tiempo y los recursos humanos y económicos invertidos.

Así entonces, los esquemas de certificación de semilla se estructuran en etapas sucesivas que se inician con la inscripción de una determinada variedad en el Registro de Variedades Aptas para la Certificación (RVAC) que lleva la División de Semillas del SAG. Los requisitos fundamentales que debe reunir una variedad para ser incluida en este registro, son:

1. **Estabilidad**: es decir que, mediante algún método de multiplicación definido por su creador, la variedad sea capaz de mantener sus características inherentes, generación tras generación.
2. **Homogeneidad**: es decir, que la variedad presente uniformidad suficiente en sus caracteres pertinentes y a resguardo de las variaciones predecibles en función del método de multiplicación (sexuada o asexuada).
3. **Distinción**: es decir, que exista la posibilidad de distinguirse como grupo, por uno o más caracteres relevantes de, cualquier otra variedad conocida.
4. **Valor Agronómico**: que la variedad a certificar demuestre alguna característica que le confiera ventajas agronómicas en relación a otras variedades de la especie. Por ejemplo, mayor rendimiento, mayor tolerancia a sequía, resistencia a algún herbicida, etc.

Una vez que la variedad es aceptada en el RVAC, debe mantenerse, para lo cual se debe inscribir su mantención en el SAG. Esta mantención se lleva a efecto en estaciones experimentales autorizadas por el SAG, donde es controlada en función de registros que deben contener, detalladamente, toda la secuencia generacional existente entre la semilla base de la variedad y la generación anterior al inicio de la certificación de semilla básica.

Históricamente, la producción de semilla certificada en Chile ha estado vinculada a los molinos arroceros y al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), siendo esta última institución la que ha desarrollado las principales variedades en Chile, a través de su Programa de Mejoramiento Genético de Arroz. Así, actualmente existen dos mantenedores de variedades de arroz. Una de ellos es Empresas Tucapel S.A. con la variedad ´Diamante-INIA`, mientras que INIA lleva la mantención de las variedades ´Zafiro-INIA`, ´Cuarzo-INIA`, ´Platino-INIA` y ´Digua CI`. Las dos últimas variedades fueron generadas y financiadas mediante un Proyecto Fondef desarrollado por INIA, entre los años 2011 y 2018.

La semilla obtenida de las mantenciones, pasa a ser el material parental inicial para conseguir las semillas certificadas en las distintas categorías. Las categorías que reconoce el DL 188/1978 son: Pre-básica; Básica; Certificada de primera generación o C1 y Certificada de segunda generación o C2. Adicionalmente, la Norma General de Certificación de semilla, (RES. EX.2638/2019 del SAG) establece que, de manera excepcional, el SAG podrá autorizar, con el consentimiento del obtentor de una variedad, la producción de una categoría adicional C3. Esto puede ocurrir, cuando existen déficits de stock de semilla de alguna variedad importante para la agricultura.

Cada categoría de semilla certificada es reconocida por una etiqueta oficial que entrega el SAG, tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Etiquetas oficiales de las diferentes categorías de semilla certificadas.

Cualquier persona, natural o jurídica en Chile, puede dedicarse a la producción de semilla certificada. Para ello, el Reglamento General exige que el productor esté inscrito en el Registro de

Productores de Semilla Certificada que lleva la División de Semillas del SAG. Los requisitos que se deben cumplir para tal efecto son:

1. Contar con los servicios de un Ingeniero Agrónomo Asesor o equipo técnico, los que deberán tener conocimientos de las normas legales y reglamentarias de semillas y de las tecnologías de producción. Los profesionales deberán ser validados por el SAG como contraparte a través de los cursos de capacitación impartidos por éste, y en tal condición, tendrán que participar en las reuniones informativas a las que sean convocados.
2. Cumplir con las disposiciones establecidas en las Normas de Certificación y en los procedimientos dictados por el Servicio, así como brindar toda clase de facilidades para la ejecución de las distintas etapas del proceso de certificación.
3. Disponer de maquinarias, equipos e instalaciones apropiadas para el secado, selección, acondicionamiento y almacenaje, acorde con la especie a producir.

Actualmente, tanto INIA, como empresas Tucapel SA., son productores de semilla certificada de arroz con registro vigente para arroz.

Los requisitos específicos de la certificación de semilla de arroz se rigen por la Resolución Exenta N° 6760/2013 del SAG. Entre los aspectos que regula esta norma a nivel de campo se cuenta:

1. **Presentación de la solicitud de certificación.** Todo productor vigente en el Registro de productores de ´semilla certificada` debe presentar una solicitud en formato oficial, existiendo un plazo que en el caso de arroz corresponde a 60 d desde la siembra del semillero.
2. **Requisitos de campo.** En campo los semilleros deberán ser fácilmente identificables, debiéndose utilizar carteles o letreros que individualizan a cada semillero o potrero perteneciente a un semillero. Así mismo, el semillero deberá reunir condiciones agronómicas, tales como control de malezas, homogeneidad de cultivo, etc., que permitan el desarrollo de las evaluaciones de campo.
3. **Aislación.** La distancia de aislación dependerá del sistema de siembra del semillero, correspondiente a 2 metros cuando la siembra sea manual o mecanizada y a 30 metros en siembras aéreas.
4. **Cumplir con el estándar de pureza varietal.** Para verificar este requisito, se realizará, al menos, una inspección oficial entre el estado fenológico lechoso hasta grano duro.

Las tolerancias máximas se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Tolerancias a nivel de campo para la certificación de semilla de arroz en Chile.

Categoría del Semillero	Contaminante	Tolerancia
Pre-básica y Básica	Fuera de tipo [(a)]	5 por cada 10.000 panículas
	Grano rojo[(b)]	0
C1	Fuera de tipo	10 por cada 10.000 panículas
	Grano rojo	1 en 50 m^2
C2	Fuera de tipo	20 por cada 10.000 panículas
	Grano rojo	1 en 50 m^2

a: planta de la especie que difiere, en uno o más caracteres fenotípicos, respecto de la descripción oficial de la variedad.
b: plantas con grano rojo, independiente de su intensidad.

La norma también establece requisitos de pureza y de calidad tecnológica a nivel de la semilla cosechada. En el Cuadro 2 se presentan las tolerancias que deben respetarse en cada categoría.

Cuadro 2. Requisitos para la semilla certificada de arroz en Chile.

Análisis	Categoría		
	Pre-Básica y Básica	C1	C2
Germinación (mínimo)	80 % (1)	80 %	80 %
Pureza varietal (mínimo) (2)	99,90 %	99,70 %	99,00 %
Pureza física (mínimo)	98 %	98 %	98 %
Otras semillas cultivadas(máximo)	8 granos kg^{-1}	20 granos kg^{-1}	30 granos kg^{-1}
Malezas (máximo) (3)	4 granos kg^{-1}	10 granos kg^{-1}	20 granos kg^{-1}
Grano rojo (máximo)	0	2 granos/700 g	4 granos/700 g

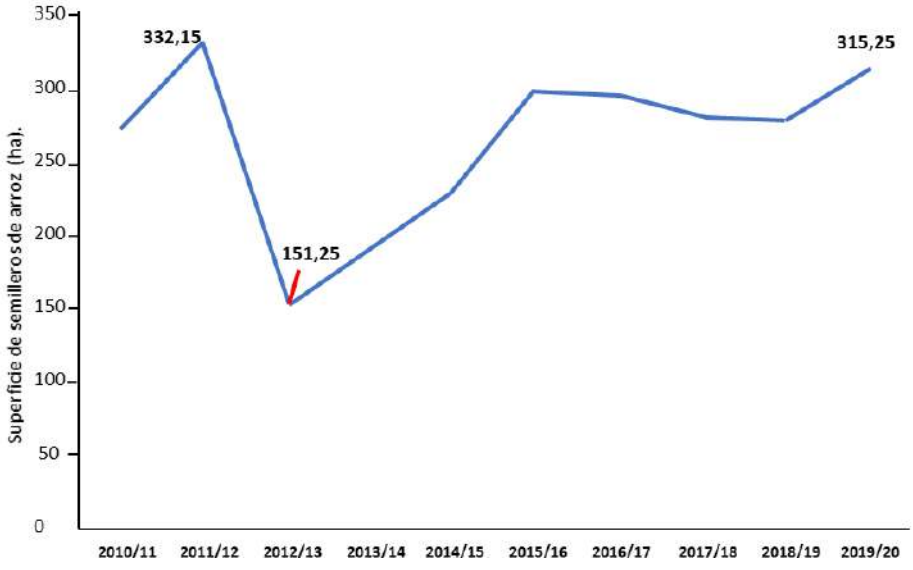
1: cuando la semilla de categoría Pre-Básica o Básica no cumpla este requisito, se podrá certificar siempre que esté destinada a multiplicación por el obtentor o mantenedor de la variedad.

2: en base a granos morfológicamente distinguibles o pruebas moleculares.

3: referido a semillas de hualcacho (*Echinochloa* spp.) y hualtata (*Alisma plantago-aquatica*).

Geográficamente, la producción de semilla de arroz se realiza en un 100 % entre el sur de la Región del Maule, en las comunas de Retiro, Parral y Cauquenes, y en la Región de Ñuble, en la comuna de San Carlos.

En términos de evolución de la certificación de arroz en el tiempo, durante los últimos 10 años, la superficie destinada a la producción de semilla en arroz ha variado entre 150,25 y 332,15 ha. Durante la temporada 2019-2020, la superficie sembrada con arroz alcanzó 315,25 ha (Figura 2).

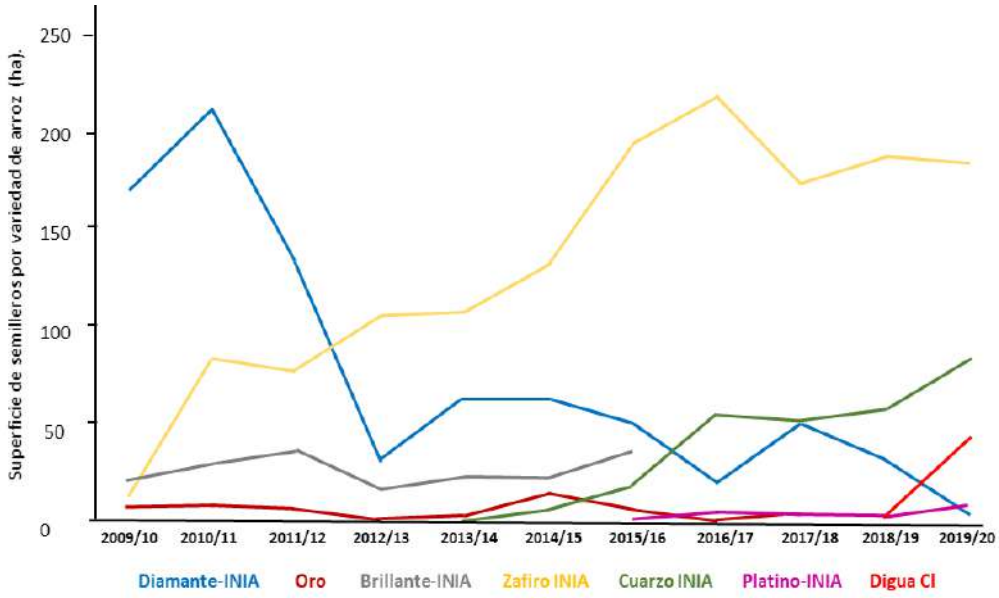


Fuente: sistema de Semillas Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). http://csm.sag.gob.cl/Common/frmLogin.aspx.

Figura 2. Evolución de la superficie de semilleros de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo certificación en Chile, entre las temporadas 2010/11 y 2019/20.

En cuanto al panorama varietal, la figura 3 demuestra la evolución en la certificación de las distintas variedades de arroz entre las temporadas 2009-2010 y 2019-2020. Se puede apreciar que hasta la temporada 2011-2012, ´Diamante-INIA` era la principal variedad. No obstante, a partir de la temporada 2012-2013, junto con una importante baja en la certificación de semilla de ´Diamante-INIA`, surge la variedad ´Zafiro-INIA` que se ha mantenido como la principal variedad hasta la actualidad. Le sigue ´Cuarzo-INIA`, que inició su certificación la temporada a 2013-2014, y su adopción va en aumento. Todas las variedades mencionadas corresponden a variedades de grano largo-ancho.

Cabe destacar que en la figura se observa la evolución reciente de ´Platino-INIA`, variedad de grano mediano, para sushi y paella, y la primera variedad clearfield chilena de grano largo-ancho ´Digua CI`, ambas generadas bajo los proyectos FONDEF D10I1183 (2011-2014) y FONDEF D10E1183 (2015-2018).



Fuente: sistema de Semillas Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). http://csm.sag.gob.cl/Common/frmLogin.aspx.

Figura 3. Evolución en la certificación de las distintas variedades de arroz chileno generados por INIA. 2009-2010/2019-2020.

Consideración final

La certificación de semillas es la forma de asegurar una alta calidad de las mismas, para que el agricultor obtenga un producto óptimo que asegure que la cadena de producción de alimentos no se vea afectada.

Referencia

Servicio Agrícola y Ganadero, SAG. 2000. Normas generales y específicas de certificación de semillas.

INIA
PROGRAMA

CIAT Centro Internacional de Agricu
adidas

Ministerio de Agricultura
Gobierno de Chile
INIA
FIA
Fundación para la Innovación Agraria