100 AÑOS DEL CULTIVO DE ARROZ EN CHILE En un contexto internacional 1920 – 2020 TOMO II

ISSN 0717-4713

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
MINISTERIO DE AGRICULTURA

100 AÑOS DEL CULTIVO DE ARROZ EN CHILE

En un contexto internacional 1920 – 2020

TOMO II

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

COLECCION LIBROS INIA – 40

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

TOMO II

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 II

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.
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 II. Libro INIA N° 40, 396 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán. Chile.

Inscripción registro de propiedad intelectual Tomo II, N° 2021-A-3884
ISSN: 0717-4713
ISBN Obra Completa: 978-956-7016-50-1
ISBN Tomo II: 978-956-7016-52-5

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
Kilometro	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
Milígramos	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 kilogramo	$mg\ kg^{-1}$
Porcentaje	%
Caloría	cal
Kilo calorías	kcal

Fuente: Newell, N., Tiesinga, E. (eds.). 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 399
Prólogo FIA 401

TOMO II: Morfología, Crecimiento, Desarrollo, Agronomía, Inocuidad, Sistemas Productivos y Desafíos 404

SECCIÓN VI. MORFOLOGÍA, CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ 406

Capítulo 14. Morfología y estados de crecimiento y desarrollo de la planta de arroz
Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Sofía Olmos, Roberto Rodríguez R. 408

Capítulo 15. Crecimiento y desarrollo de la planta de arroz en Chile
Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V. 446

SECCIÓN VII. AGRONOMÍA 474

Capítulo 16. Fertilización del cultivo de arroz
Juan Hirzel C. 476

Capítulo 17. Fertilización del cultivo de arroz para sistema de siembra directa
Juan Hirzel C., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. 500

Capítulo 18. Manejo del arroz rojo a través de herbicidas imidazolinonas en cultivares resistentes en Brasil
Aldo Merotto Jr., Catarine Markus, André Andres, Germani Concenço 515

Capítulo 19. Cultivo del arroz en Italia y Europa
Francesco Vidotto, Silvia Fogliatto 531

Capítulo 20. Malezas del cultivo de arroz en Chile
Alicia Marticorena G., Víctor Finot S. 547

Capítulo 21. Control de malezas del arroz en Chile
Alejandro Toro Y., Mario Paredes C., Jorge Nitsche M., Fernando Pardo del C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V. 583

Capítulo 22. Visión mundial del uso del agua en el cultivo de arroz
Gonzalo Carracelas G., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Hamil Uribe C. 611

Capítulo 23. Manejo del agua de riego en el cultivo de arroz en Chile
Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Hamil Uribe C., Gonzalo Carracelas G. 629

SECCIÓN VIII. INOCUIDAD Y SUSTENTABILIDAD 650

Capítulo 24. Emisiones de gases de efecto invernadero en producción de arroz de riego
Walkyria B. Scivittaro, Rogério O. de Sousa, Leandro S. da Silva, Santiago V. Cuadra, Alexandre B. Heinemann 652

Capítulo 25. Emisiones de gases de efecto invernadero en el cultivo del arroz en Chile
Sara Hube S., Gabriel Donoso Ñ., Marta Alfaro V., Viviana Becerra V., Mario Paredes C. 674

Capítulo 26. Metales pesados en arroz
Eimmy Ramírez M., Jorge Yáñez S., Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V. 687

Capítulo 27. Niveles de arsénico en arroz comercializado en Chile
Eimmy Ramírez M., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Yáñez S., Mario Paredes C., Viviana Becerra V. 697

Capítulo 28. Concentración de arsénico en arroz con diferentes manejos agronómicos
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Yáñez S., Eimmy Ramírez M. 705

SECCIÓN IX. SISTEMAS PRODUCTIVOS 712

Capítulo 29. Experiencia de la Fundación Chile (FCh) en la adaptación e implementación del Cropcheck para el cultivo del arroz (Ricecheck)
Mauricio Toro T. 714

Capítulo 30. Sistema de siembra de arroz con semilla pre-germinada sobre suelo inundado
Ramón Henríquez S., Marcelo Ibáñez A., Eduardo Godoy C., Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Nelso Badilla R. 727

Capítulo 31. Siembra directa en el cultivo de arroz en Chile
Ramón Henríquez S., Gonzalo Henríquez S., Manuel Maureira C., Víctor Salas C., Joel Aravena C., Jaime Mellado S., Christian Véliz P., María Falcón E., Verónica Retamal P. 738

Capítulo 32. Sistema de producción Clearfield® en arroz
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Juan Hirzel C., Fernando Jofré S-G., Ángela Aedo A., Nicolás Silva L. 759

SECCIÓN X. DESAFÍOS PARA EL CULTIVO DEL ARROZ EN CHILE PARA LA PRÓXIMA DÉCADA
Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ. 772

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

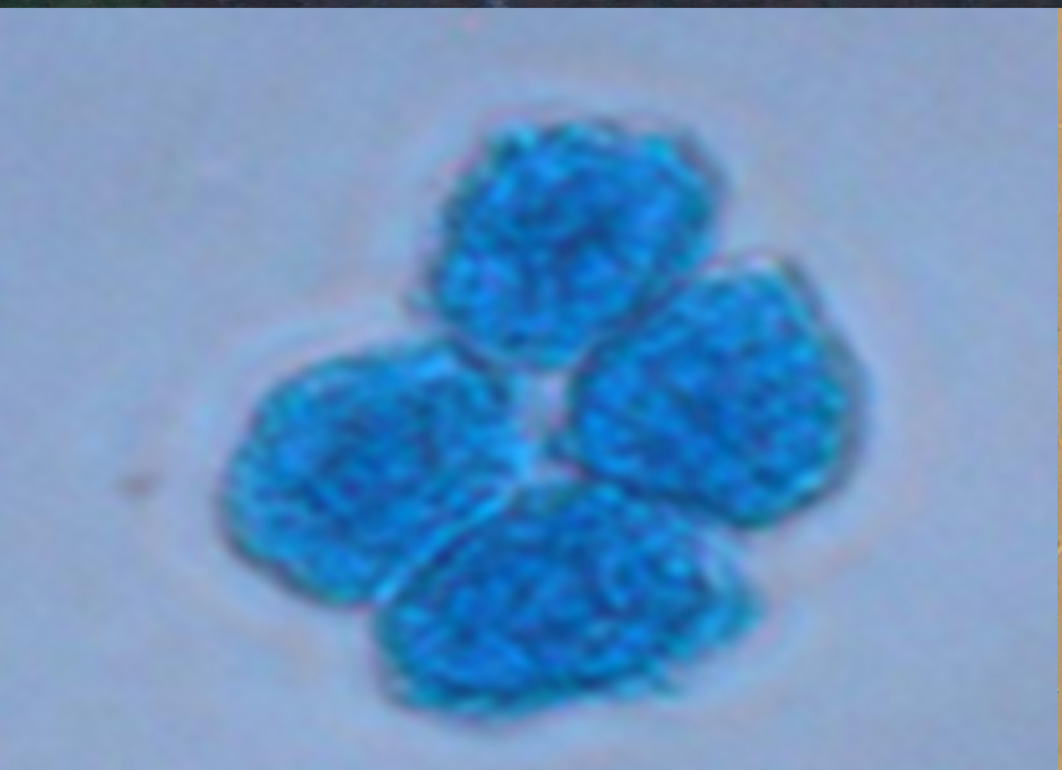
para promover la inocuidad de los alimentos, salud de la población, sustentabilidad y competitividad de cultivo. INIA, Asociados: Subsecretaria de Agricultura; Asociación Gremial de Arroceros de Unicaven; Asociación Gremial de Comités Campesinos Rubro Arroz; Comité Campesino El Crucero de Buli; Comité Campesino Productores de Arroz Millauquen 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.

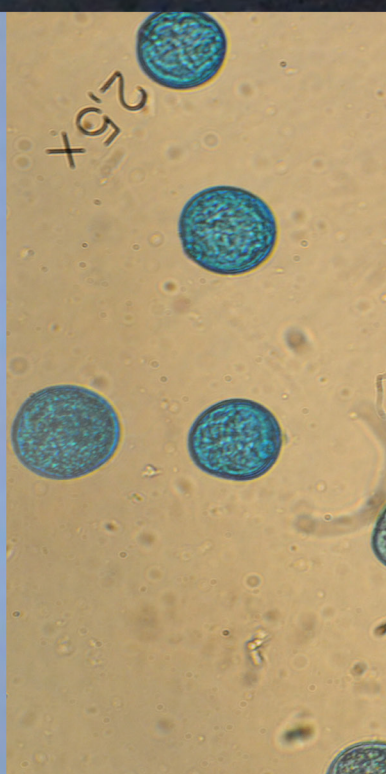
Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz en Chile, una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de este cultivo frente al cambio climático global. INIA. Empresas asociadas: Tucapel S.A.; Carozzi, S.A.; Asociación Gremial de Arroceros de Unicaven; Comité Campesino 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.

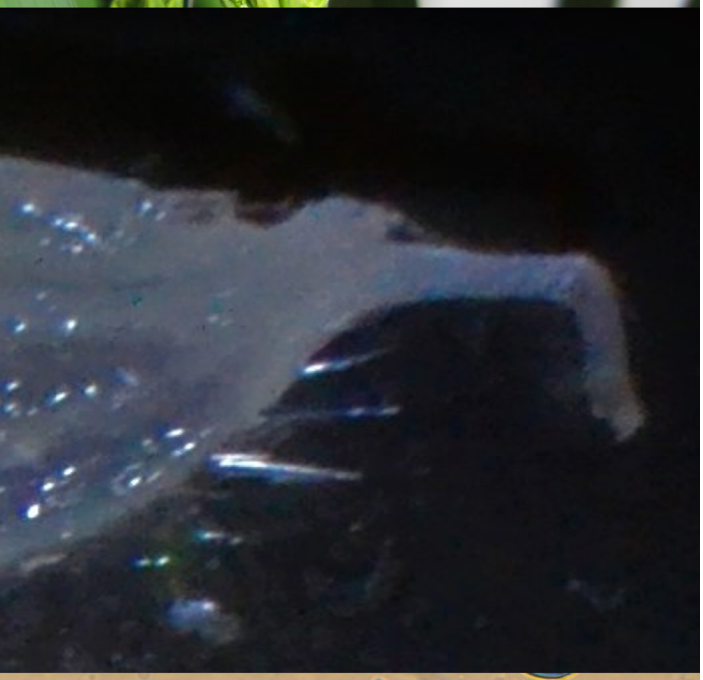
Validación de estrategias de riego para el cultivo del arroz, para una producción eficiente y competitiva de menor impacto ambiental con productores familiares de Colombia, Perú y Chile. Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Marta Alfaro V., Sara Hube S., Juan Hirzel C., Hamil Uribe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

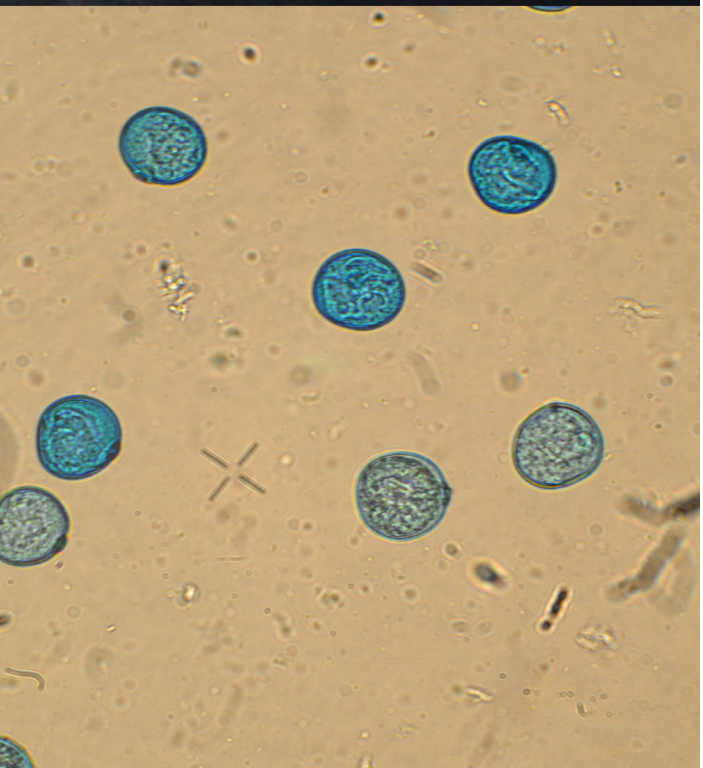
Generación de un sistema de producción de arroz inocuo, con un menor uso de agua y basado en una evaluación de riesgo. Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Yáñez S., Eimmy Ramírez M., Juan Hirzel C., Hamil Uribe C., Gustavo Sotomayor D. INIA, Universidad de Concepción. Instituciones asociadas: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

MORFOLOGÍA, CRECIMIENTO, DESARROLLO, AGRONOMÍA, INOCUIDAD, SISTEMAS PRODUCTIVOS Y DESAFÍOS




2,6x





SECCIÓN VI. MORFOLOGÍA, CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ

Capítulo 14. Morfología y estados de crecimiento y desarrollo de la planta de arroz

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Sofía Olmos, Roberto Rodríguez R.

I. MORFOLOGÍA DE LA PLANTA DE ARROZ

El conocimiento de las características morfológicas de la planta tiene una utilidad práctica, ya que permite caracterizarla fenotípicamente, identificar sus diferentes estados de crecimiento y desarrollo, identificar el momento apropiado para realizar una práctica agronómica determinada (aplicación de nitrógeno, herbicida, manejo del agua, otros) y describir una variedad con fines científicos, técnicos y comerciales.

En climas templados y subtropicales, el arroz cultivado se considera una planta anual, semi-acuática, aunque en condiciones tropicales puede sobrevivir como planta perenne, al rebrotar luego de realizada la cosecha, lo cual podría generar una segunda cosecha o forraje para el pastoreo de animales.

Morfología de la raíz

El desarrollo de las raíces está controlado por factores genéticos y ambientales (Yang y Hwa, 2008; Meng et al., 2019; Zhao et al., 2019). Las raíces tienen diversas funciones, al servir como soporte y fijación de la planta, absorción de agua y nutrientes, y constante monitorización de las condiciones del suelo (contenido de agua, nivel de nutrientes y presencia de elementos tóxicos). Es por ello que están constantemente adaptándose a su ambiente (Gu et al., 2017).

La planta de arroz desarrolla tres tipos de raíces: radícula (raíz primaria), raíces del mesocótilo (parte del tallo entre el coleóptilo y la primera hoja) y raíces adventicias (o nodales) (Foto 1). Estos tres tipos de raíces se forman a partir de diferentes tejidos: embrión, mesocótilo y nudos del tallo, respectivamente (Yoshida, 1981; Moldenhauer y Gibbons, 2003).

La radícula emerge del eje basal-dorsal del embrión, lo cual está regulado genéticamente (Yang y Hwa, 2008). Esta raíz es única y puede alcanzar unos 15 cm. Su función principal es la absorción de nutrientes y agua desde la emergencia, el estado de plántula hasta el estado de la séptima hoja visible (Yoshida, 1981; Moldenhauer y Gibbons, 2003).

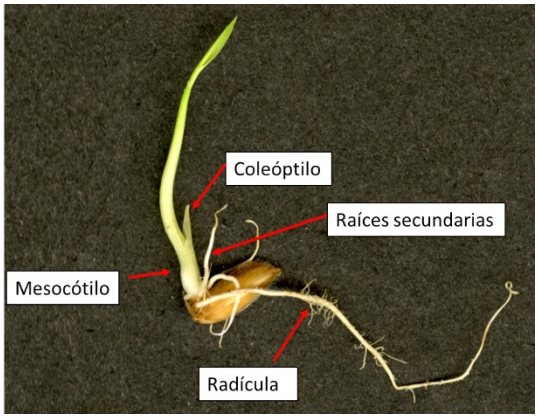


Foto 1. Radícula seminal, coleóptilo e hipocótilo de plántula de arroz.

La raíz del mesocótilo se puede formar en condiciones especiales de manejo, por ejemplo, una siembra profunda o tratamiento de la semilla con productos químicos. Estas raíces son delgadas, no ramificadas, y se desarrollan desde la parte inferior a la superior del mesocótilo y crecen horizontalmente (Yoshida, 1981; Moldenhauer y Gibbons, 2003).

Las raíces adventicias componen el sistema radicular del arroz y se desarrollan en los nudos del tallo (Foto 2). Las raíces que se forman en los nudos del tallo se llaman primarias. El número de raíces que emerge de cada tallo y su largo aumentan hasta la emergencia de la panoja. Las raíces adventicias primarias dan origen a raíces secundarias, las que a su vez originan raíces terciarias y así sucesivamente. A medida que se van ramificando, van disminuyendo su diámetro (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

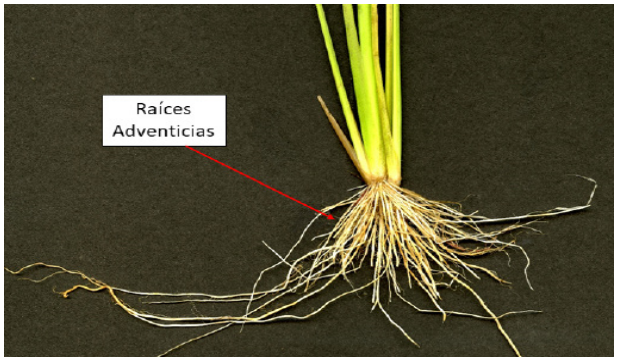


Foto 2. Raíces adventicias de planta de arroz adulta.

En los sistemas inundados, la planta de arroz posee estrategias para enfrentar la inundación y favorecer su crecimiento. Para ello genera: 1) la emisión de raíces adventicias que nacen a partir del sub-nudo ubicado entre la unión del mesocótilo con el coleóptilo; 2) la formación del aerénquima que evita la asfixia radicular (Vriezen et al., 2003); 3) el incremento de la elongación del tallo ante el aumento de la profundidad de la lámina de agua, permitiendo a las hojas alcanzar el espacio aéreo para realizar su metabolismo aeróbico y fijar CO_2 (Vriezen et al., 2003; Sarkar et al., 2006); 4) la absorción más eficiente del nitrógeno en forma de amonio en condiciones de inundación (Yoshida, 1981); y 5) una mayor acumulación de carbohidratos en condiciones de inundación (Das et al., 2005; Kawano et al., 2009).

En este sentido, la raíz del arroz ha desarrollado grandes espacios de aire denominados aerénquimas, similares a tubos que se conectan con otros espacios de aire similares, ubicados en el tallo y las hojas (Yoshida, 1981). En la planta de arroz el aerénquima se forma con o sin inundación, pero bajo inundación los espacios de aire son más numerosos y más grandes, lo que brinda un mecanismo de adaptación (Yoshida, 1981). Esta estructura forma un conducto de difusión del aire desde la atmósfera hacia la raíz, y es utilizado en la respiración. El aire que llega desde la atmósfera hasta la raíz, sale de ellas y se difunde en el suelo, creando en la rizósfera una interfase de óxido-reducción (Drew et al., 2000; Steffens et al., 2011). Bajo inundación continua, la rizósfera del arroz mantiene una gran capacidad de oxidación hasta el inicio de la etapa reproductiva. Desde el momento de la diferenciación del primordio de la panoja hasta el de floración, la rizósfera se vuelve reductiva, lo que se relaciona a la ocurrencia de los procesos de óxido-reducción del suelo más que a la etapa fenológica. Es así como, al inicio de la etapa reproductiva, la planta es muy susceptible a la toxicidad de los compuestos reducidos que se forman y, según el manejo del suelo, el potencial redox del suelo puede ser tan bajo que se desarrollan en la interfase suelo-agua otro tipo de raíces, en forma de mata, que absorben el oxígeno del agua superficial y que contribuirían con la oxidación del sistema radical más profundo (Yoshida, 1981).

Morfología del tallo

El tallo es una estructura erecta, de forma cilíndrica y con un número variable de nudos. La porción del tallo ubicada entre nudos es hueca y finamente estriada y se denomina entrenudo (Chang et al., 1965).

En relación al crecimiento vegetativo, la unidad básica y repetitiva de crecimiento del tallo está basada en el concepto de fitómero. Esta unidad se define como un entrenudo que produce una hoja en su parte superior, una yema de macollo en la parte inferior, y una raíz en la parte superior e inferior (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

Así, cada tallo está compuesto de nudos y entrenudos. El nudo es la parte compacta del tallo donde se adhiere la base de la vaina de la hoja. La formación y expansión de un entrenudo hueco sobre la corona da origen al tallo, y determina su longitud y, en parte, la altura de la planta. El entrenudo se forma entre el nudo superior de la corona y el nudo del tallo recién formado. El crecimiento del tallo es producto, principalmente, del crecimiento de sus células en longitud. Este proceso de elongación de los tallos ocurre en forma similar en las macollas, aunque un poco más tarde que en el tallo principal (Dunand y Saichuk, 2009).

El primer entrenudo es llamado basal, siendo el más corto y grueso. Está ubicado sobre la corona y no posee raíces. El último entrenudo es el más largo y delgado, conectándose directamente con la base de la panícula. El número de entrenudos que se forma en el tallo principal es más o menos constante en cada variedad, y puede variar entre cinco y seis visibles por arriba de la corona. Los tallos de las macollas poseen menos entrenudos y se forman después de los entrenudos del tallo principal (Chang et al., 1965).

Una vez que el primer nudo se asoma sobre la superficie del suelo, comienza una etapa de rápido crecimiento de la planta. Es decir, el tallo principal se elonga y aparecen en forma sucesiva nuevos nudos y entrenudos, ya que en los nudos se encuentran los meristemas intercalares que producen nuevas células para el crecimiento de los tallos (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

Durante la fase vegetativa, la elongación de los entrenudos es escasa y permanece cerca del suelo. Sin embargo, en el momento de la diferenciación del primordio de la panícula, los nudos superiores se elongan para permitir la excersión de ésta. Por lo tanto, el tallo maduro posee una porción no elongada y otra elongada; es decir, los entrenudos más cercanos a la base del tallo son más cortos que los ubicados en su parte superior (Moldenhauer y Gibbons, 2003). La elongación de los entrenudos está estrechamente asociada a la duración del crecimiento de la planta. Es así como, en variedades precoces y semi-precoces, comienza alrededor del inicio del crecimiento del primordio mientras que, en variedades tardías, comienza antes del inicio de este proceso (Yoshida, 1981).

El tallo principal es el primer tallo de la planta y se desarrolla temprano en la fase vegetativa. Posee un número predeterminado de hojas que depende de la variedad y de las condiciones ambientales. El nudo del coleóptilo, ubicado en la base del tallo, es morfológicamente único, pues no forma macollas, aunque el primordio radicular da origen a una única raíz primaria. Se considera que el número de nudos es igual al número de hojas de la planta más dos, que serían el nudo del coleóptilo y el nudo de inserción de la panícula (neck-node) (Yoshida, 1981).

Las macollas son tallos secundarios que se desarrollan desde el tallo principal, a partir de la yema axilar existente en uno de los primeros nudos del tallo principal (Foto 3). En cada tallo se forman primordios de macollas, los que están ubicados en cada base de la hoja. Cuando emerge la quinta hoja en el tallo principal, aparece la primera hoja en la macolla de la axila de la segunda hoja del mismo tallo. Así, la emergencia de la hoja del tallo principal y de la macolla crecen en forma sincronizada. Por otro lado, el coleóptilo y la primera hoja (prófilo) normalmente no producen macollas (Yoshida, 1981).

Cada macolla constituye una unidad completa, compuesta de un tallo, raíces, hojas, macollas y panículas. Por lo tanto, las macollas, y según el manejo del cultivo, contribuyen al rendimiento final. Las macollas se pueden separar de la planta y ser trasplantadas, sirviendo como un medio de propagación vegetativa de la planta (Dunand y Saichuk, 2009).

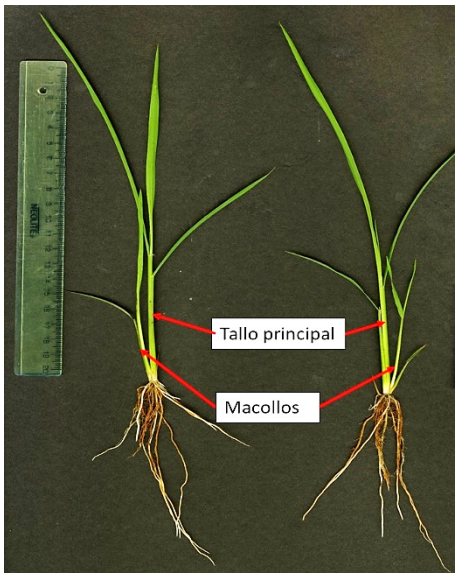


Foto 3. Plántulas en inicio de macolla.

Las macollas se forman en orden alterno en el tallo principal. Las macollas que crecen desde el tallo principal se llaman macollas primarias. Estas macollas primarias pueden generar macollas secundarias y, a partir de ellas, las macollas terciarias (Chang et al., 1965). Las macollas son morfológicamente difíciles de distinguir del tallo principal. Por tal motivo, deben ser identificadas temprano en el desarrollo de la planta (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

La primera macolla se desarrolla cuando la planta tiene aproximadamente unas cinco hojas visibles, ubicándose entre el tallo principal y la segunda hoja (primera hoja verdadera) (Yoshida, 1981). Cuando la planta tiene seis hojas, emerge la segunda macolla que se ubica entre el tallo principal y la tercera hoja (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

El número total de macollas depende de la variedad y de factores agronómicos, tales como densidad de población, fecha de siembra, fertilidad del suelo, entre otros. Las macollas secundarias y terciarias presentan menor crecimiento que el tallo principal y son menos productivas (Yoshida, 1981). Bajo condiciones de siembra de alta densidad, generalmente utilizando variedades modernas semi-enanas, las plantas producen al menos una macolla principal. Así, en el momento de la cosecha, la panícula de la macolla primaria iguala en madurez a la del tallo principal, contribuyendo significativamente al rendimiento final del cultivo.

La altura del tallo principal constituye la altura de la planta y se mide desde el suelo al ápice de la panícula. La reducción de la altura de la planta de arroz en las variedades modernas semi-enanas ha significado un salto productivo muy importante en el mundo, llamado Revolución Verde. La base genética de esta reducción de altura es la presencia de un alelo mutante *sd-1* (*semi-dwardf-1*) que regula la menor altura del tallo y la menor longitud del coleóptilo en la germinación (Turner et al., 1982; Dilday et al., 1990). La altura de planta es un factor muy importante, relacionado con la respuesta del cultivo a la tendedura (vuelco) ocasionado por tormentas, vientos intensos y/o exceso de fertilización nitrogenada. Por este motivo, al bajar la altura de la planta, se aumentaron los rendimientos del cultivo (Wu et al., 2011).

En arroz se distinguen cuatro causas que contribuyen a la tendedura de la planta: un pobre crecimiento radicular, el debilitamiento de los entrenudos inferiores del tallo, la sensibilidad a los vientos fuertes debido a la mayor altura y la curvatura del tallo que se produce por el gran peso de la panoja (Hirano et al., 2017). A nivel morfo-anatómico, el mayor diámetro de entrenudos, el acortamiento de los entrenudos basales y el mayor peso por unidad de longitud de las vainas de las hojas, son caracteres que disminuyen la tendedura (vuelcos) (Zhang et al., 2014; 2016). Sin embargo, la reducción de altura no siempre es benéfica, ya que ocasiona una reducción de biomasa y una menor distribución de fotosintatos al grano, comprometiendo el rendimiento (Hirano et al., 2017). A su vez, es claro que las vainas de las hojas de la planta de arroz tienen una importante contribución sobre la resistencia de los tallos. El tallo permanece protegido por la vaina de la hoja, hasta que una pequeña porción del tallo queda excerto con la panícula después de la emergencia de la panoja (Yoshida, 1981).

Morfología de las hojas

Las hojas de la planta se producen repetitivamente como órganos laterales del meristema apical del tallo. El desarrollo de la hoja es un proceso complejo que incluye división y expansión celular, determinación del eje y su diferenciación, y especificación de los tejidos (Itoh et al., 2005).

Las hojas de la planta se encuentran distribuidas en forma alterna a lo largo del tallo y están formadas por tres componentes:

a) La vaina: Es la parte proximal de la hoja que envuelve el ápice del tallo y las hojas nuevas para su protección de posibles daños físicos. La vaina está adherida, en su parte basal, al nudo. Actúa como soporte durante la etapa vegetativa de la planta y como un lugar de acumulación de almidón y azúcar, antes de la emergencia de la panoja (Foto 4). Durante la fase reproductiva, la vaina ayuda a proteger y soportar el tallo. Es fotosintéticamente activa y protege el desarrollo de la panícula (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Itoh et al., 2005).

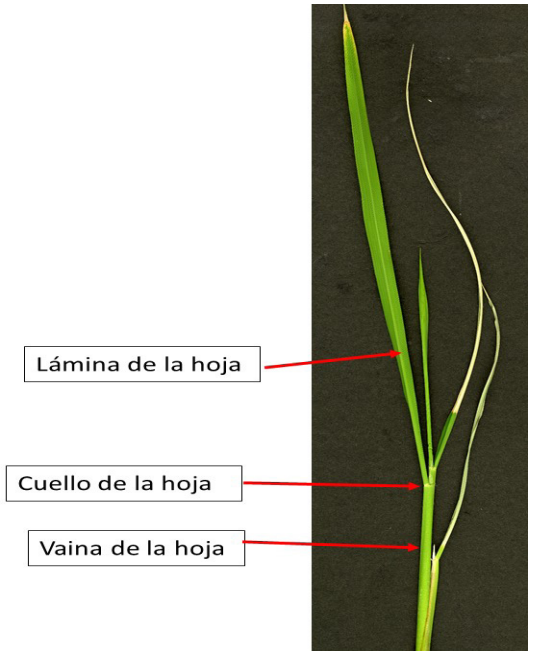


Foto 4. Vaina, cuello y lámina de la hoja en arroz.

b) Cuello: El límite de unión entre la lámina y la vaina de la hoja es llamado cuello, pudiendo ser de color verde o púrpura. Es donde se encuentra la lígula y la aurícula. La lígula es una estructura delgada, triangular y membranosa, ubicada entre la lámina de la hoja y la vaina, y puede tener diferentes formas y colores (Chang et al., 1965). La función de la lígula no está muy clara, pero se postula que regula la humedad y la aireación de la zona comprendida entre el tallo y la vaina, o previene la entrada del agua de lluvia a la vaina. Las aurículas son dos apéndices que se encuentran en el límite entre la vaina y el cuello, y pueden ser de color blanco o verde. Algunas variedades no tienen lígula ni aurícula (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Itoh et al., 2005), aunque la mayoría de las variedades comerciales de arroz las tienen. Estas estructuras son agronómicamente importantes (Foto 5), pues permiten en la emergencia, diferenciar la planta de arroz de malezas como, por ejemplo, *Echinochloa* spp. que carece de lígula y aurícula.

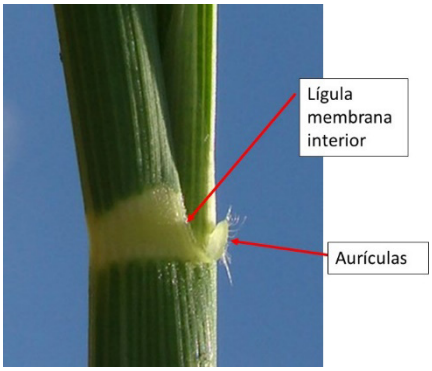


Foto 5. Lígulas y aurículas presentes en la planta de arroz.

c) Lámina: Es la región distal de la hoja. La lámina de la hoja es larga y lanceolada. Posee venas paralelas y su superficie puede ser pubescente o glabra (no pubescente). La lámina es el órgano principal para la fotosíntesis y la transpiración de la planta. El largo de la lámina de la hoja aumenta a medida que se ubica en las posiciones más altas de la planta (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Itoh et al., 2005).

En el haz de la hoja se encuentran células buliformes ubicadas en hileras verticales entre los dos tipos de haces vasculares, xilema ubicado en el haz de la hoja y floema en el envés de la hoja, donde es posible encontrar también numerosas papilas y varios tipos de tricomas (vellosidades) que son detectables a nivel macroscópico (Moldenhauer y Gibbons, 2003). Las variedades de arroz pueden tener a la vista y al tacto, lámina foliar sin tricomas (glabra) o con tricomas (pubescentes). La pubescencia foliar (que suele ir acompañada de pubescencia en la cariópside) puede ser agronómicamente ventajosa como una protección ante estreses bióticos y abióticos, pero desventajosa para la cosecha y poscosecha, ya que los tricomas de arroz, que acumulan sílice, son muy ásperos, abrasivos y desgastan las piezas de las maquinarias (Hu et al., 2013).

Los estomas son células complejas que están especializadas para el intercambio gaseoso entre la hoja y el medio ambiente. Los estomas se distribuyen en hileras verticales en la superficie de la hoja y consisten en dos células de guarda, angostas y con paredes gruesas, y dos células subsidiarias que rodean las células estomáticas (Itoh et al., 2005).

Morfología de la inflorescencia, panícula o panoja

El arroz es una planta de día corto y sin requerimientos de vernalización. Existe variabilidad genética para la sensibilidad al fotoperíodo. De esta forma, los cultivares pueden clasificarse según el

tiempo que demoran en llegar a la diferenciación del primordio floral en altamente sensibles, medianamente sensibles e insensibles al fotoperíodo (Yoshida, 1981). La mayoría de las variedades comerciales son insensibles al fotoperíodo, donde el tiempo a floración no depende de la longitud del día. La inflorescencia del arroz es clasificada como una panoja compuesta formada de un número variable de espiguillas (Ikeda et al., 2004; Yang et al., 2006).

La formación de la panícula comienza con la diferenciación del primordio floral, y está influenciada por factores genéticos y ambientales. Desde la diferenciación del primordio floral hasta la iniciación de la panícula visible (1 mm) transcurren entre 7 y 10 d, y 30 d hasta la floración (Foto 6) (Yoshida, 1981).

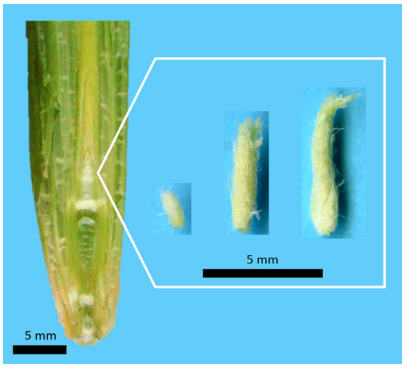


Foto 6. Inicio de desarrollo de panícula, entre 3 y 5 mm, para tres variedades comerciales chilenas de arroz.

La estructura floral del arroz es la espiguilla que está formada por las glumas (lemma y pálea) y la flor. La flor tiene seis estambres compuestos por filamentos y anteras. Cada antera está formada por cuatro sacos donde se almacenan los granos de polen. El desarrollo de todas estas estructuras está bajo control genético (Yoshida y Nagato, 2011).

La estructura de la panícula varía según las variedades y es importante porque contribuye al rendimiento final del grano. El crecimiento de los granos varía según la ubicación dentro de la panícula, siendo, en algunos casos, los más desarrollados y productivos los que se ubican en la parte superior (Yang y Zhang, 2010). La inflorescencia tiene dos tipos de meristemas; el del raquis y el de las ramas. El meristema del raquis no se convierte en meristema de la espiguilla, aborta y se mantiene como vestigial cerca de la base de la última rama principal. En contraste, las ramas primarias y secundarias terminan en flores (Ikeda et al., 2004).

La panícula está ubicada sobre el nudo apical del tallo, llamado nudo ciliar o basal, y generalmente carece de yemas y hojas. La panícula está compuesta de cuello nodal (o base), raquis (o axis), ramas primarias y secundarias, pedicelos, glumas rudimentarias y espiguillas (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Moldenhauer et al., 2018). Las ramas primarias generalmente aparecen 8 a 10 d después de la emergencia de la panoja, cuando se separan del raquis y pueden tener ramas secundarias. Las ramas primarias se forman en espiral. La mayor longitud de la rama primaria se observa en la cuarta o quinta rama y decrece hacia el ápice. El número de ramas secundarias se correlaciona positivamente con la longitud de las ramas primarias (Ikeda et al., 2004).

Los pedicelos se forman desde los nudos en los extremos de las ramas primarias y desde los nudos de ramas secundarias y las espiguillas del término de los pedicelos (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

Al finalizar el período vegetativo, después de producirse la última hoja, la hoja bandera, el meristema apical del tallo se convierte en el meristema de la inflorescencia (meristema del raquis) que se encarga de producir las brácteas (primordios) y las ramas primarias en arreglo espiral. Cuando todos los primordios de las ramas primarias se han producido, comienza el período de elonga-

ción, casi simultáneamente. El desarrollo posterior es mayor en las ramas distales que en las proximales (Ikeda et al., 2004). El ápice de cada rama principal mantiene su actividad meristemática y produce brácteas, ramas secundarias y espiguillas. Las ramas secundarias no presentan alternancia en su crecimiento, sino superposición en dos hileras con un ángulo de divergencia de, aproximadamente, 110°. Cuando la inflorescencia alcanza 40 mm de longitud y tiene todos los órganos formados, comienza un proceso de rápida elongación de la inflorescencia y de todos sus órganos, seguido por la diferenciación del óvulo y de las anteras (Ikeda et al., 2004).

Las panículas pueden ser compactas, intermedias o abiertas, según el ángulo que formen las ramificaciones al salir del eje de la panícula. Las espiguillas que primero florecen son las ubicadas en la parte superior y luego la floración progresa hacia la base. Dentro de la panoja la floración tarda entre 7 y 10 d, mientras que en el cultivo tarda de 15 a 20 d, porque se suma el efecto del desarrollo tardío de las macollas. La panícula se mantiene erecta durante la floración y se va doblando progresivamente a medida que ocurre el llenado de los granos (Yoshida, 1981).

Morfología de la espiguilla

En la inflorescencia del arroz, la espiguilla está directamente conectada a las ramas laterales de la panoja mediante el pedicelo, cuyo número se reduce en sentido acropétalo (desde la base al ápice). Las ramas laterales de la panoja que están adheridas directamente al raquis, se denominan ramas primarias y las que están sujetas a las ramas primarias se llaman ramas secundarias. Si la rama es suficientemente pequeña como para estar compuesta por una sola espiguilla se llama pedúnculo (Ikeda et al., 2004; Yang et al., 2006).

Los meristemas de las ramas primarias y secundarias producen el primordio de las espiguillas. Sus extremos funcionan como meristemas (meristema de la espiguilla) y se diferencian en órganos laterales que forman la espiguilla. Teóricamente la espiguilla de la planta de arroz posee tres flores. Sin embargo, se desarrolla una sola flor ya que el meristema de la espiguilla se convierte en meristema floral después de producir dos pares de glumas estériles, por lo cual, en muchas ocasiones se usan los términos ´flor` y ´espiguilla` como sinónimos (Foto 7).

Sobre estas dos glumas rudimentarias se producen dos nuevas glumas, también estériles, pero de mayor tamaño, llamadas ´glumas vacías`, y dos glumas de mayor tamaño llamadas lemma y pálea. La lemma es de mayor tamaño que la pálea y posee cinco ejes vasculares mientras que la pálea posee sólo tres. Las seis glumas poseen un arreglo alternado. La lemma y la pálea cubren la flor, pudiendo o no tener aristas (Chang et al., 1965).

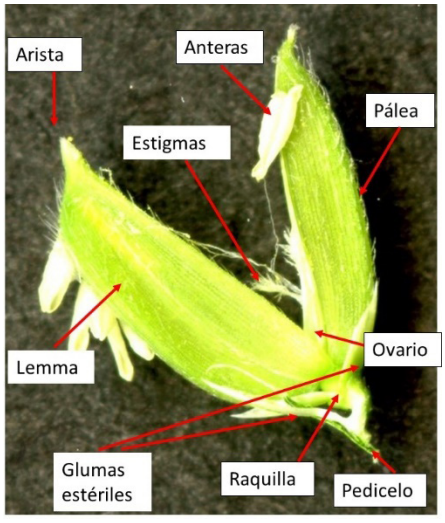


Foto 7. Espiguilla completa que contiene la flor.

Con posterioridad a la formación de la pálea se forman tres clases de órganos florales, pasando el meristema a llamarse meristema floral. El primer órgano consiste de dos lodículos (pétalos), ubicados en el lado de la lemma, y la formación de seis primordios estambres. Alrededor de la formación del primordio del carpelo, los estambres están compuestos por el filamento y las anteras. Finalmente, el primordio del carpelo se diferencia desde la parte de la lemma del meristema floral y crece para cubrir el meristema floral. Emergen dos estigmas después que el carpelo cubre el meristema. Posteriormente el meristema deja de ser un tejido indeterminado y se transforma en el primordio del óvulo, en el cual ocurre la megagametogénesis para formar el saco embrionario (Ikeda et al., 2004) (Foto 8).

Los lodículos son los responsables de la apertura de la flor. Durante la antesis, los lodículos se ponen turgentes logrando la separación de la lemma y la pálea. Simultáneamente los estambres se alargan y emergen las anteras (Ikeda et al., 2004). La dehiscencia (apertura) de las anteras puede producirse antes o al mismo tiempo que la separación de las glumas. Las glumas se cierran después que las anteras derraman el polen. La flor se encuentra unida a la espiguilla a través de la raquilla (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Moldenhauer et al., 2018).

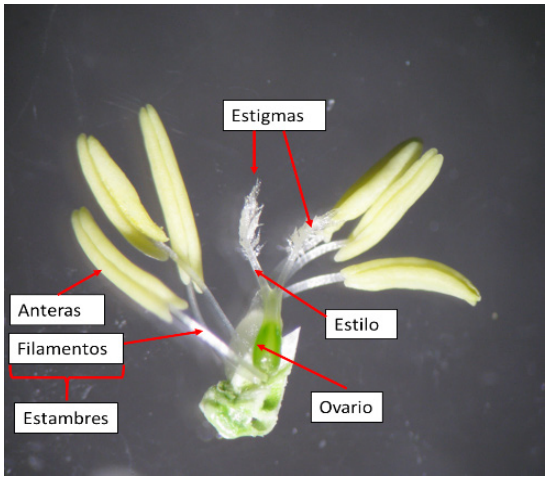


Foto 8. Órganos internos de la flor del arroz, sin lemma y palea.

El óvulo contiene tres estructuras morfológicamente diferentes. La nucela que es la parte terminal del óvulo y el lugar donde se forma el saco embrional. Rodeando la nucela se encuentran los dos tegumentos que dejan una pequeña abertura, el micrópilo, a través del cual el tubo polínico accede al saco embrionario. Finalmente se encuentra el funículo en la parte basal del óvulo, una estructura de soporte que une el óvulo a la región de la placenta dentro del carpelo; pero además sirve de conducto para el paso de los nutrientes al óvulo y embrión en desarrollo (Gasser et al., 1998; Skinner et al., 2004).

La antera es el órgano reproductivo masculino que contribuye a la polinización del óvulo, para producir la semilla. La planta de arroz es de autopolinización, con un porcentaje de polinización cruzada menor al 1 %; es decir, el polen contenido en la antera de una flor poliniza y fecunda la misma flor (Matsui y Kagata, 2003; Win et al., 2020).

Morfología del grano con cáscara o grano paddy

El grano es una estructura formada por dos brácteas, una externa llamada lemma y otra interna llamada pálea, y la cariopsis o cariópside que corresponde al fruto. En el grano maduro, la lemma

y la pálea están unidas una con otra por tricomas especializados que se forman en los bordes para cerrar la cariopsis (Foto 9).

Foto 9. Grano inmaduro de arroz.

Durante el desarrollo del grano, las funciones de la lemma y la pálea es proveer asimilados al desarrollo de la cariópside, regular el balance de agua durante el llenado del grano e imponer un límite en el tamaño de la cariópside (Counce et al., 2003; Krishnan y Dayanandan, 2003). A la madurez, las lemmas estériles, raquilla, pálea y lemma conforman la cáscara del grano (Foto 10a). La lemma cubre dos tercios de la semilla (Chang et al., 1965).

Posterior a la cosecha, el proceso industrial del grano comprende dos etapas: descascarado y pulido. Durante el descascarado se remueve la lemma y la pálea de la cariópside. Durante el pulido todo el tejido maternal, incluyendo el pericarpio, la testa, la aleurona y el embrión, son removidos como salvado, produciéndose el grano pulido que consiste principalmente en el endospermo (Foto 10b). El endospermo contiene principalmente almidón. Las proteínas se almacenan en el endospermo y aleurona, y las grasas en la aleurona y el embrión (Juliano y Bechtel, 1985; Wu et al., 2016a).

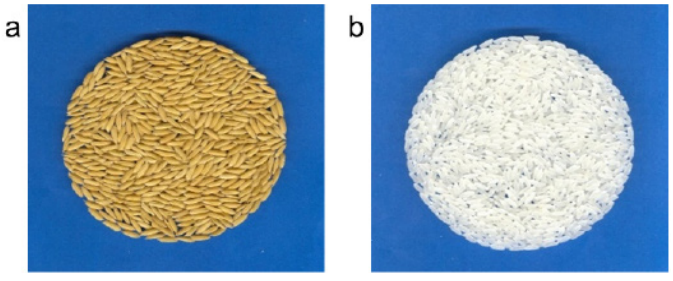


Foto 10. Cariópside maduro de arroz, correspondiente al grano paddy (a) y grano pulido (b).

La cáscara constituye, aproximadamente, el 20 % del peso total del grano, el salvado al 10 % y el arroz blanco pulido a un 70 %. Este último está formado por granos enteros y partidos (Dhankhar, 2014).

La cariópside es el ovario maduro seco e indehiscente y cuyo desarrollo ocurre en un espacio herméticamente cerrado, cubierto por la pálea y la lemma (Chang et al., 1965). La cariópside está formada por tres tejidos genéticamente distintos como el pericarpio, cáscara y nucela que son diploides; el endospermo que es triploide; y el embrión que es un tejido diploide. Todos estos componentes de la cariópside son inertes, con excepción del embrión y la aleurona (Krishnan y Dayanandan, 2003; Wu et al., 2016a).

La cariópside está envuelta por el pericarpio. El pericarpio es fibroso y varía en grosor. El pericarpio contiene tres haces vasculares, el mayor ubicado en la parte dorsal, y dos menores en la parte lateral. El haz vascular tiene la función de entregar agua, minerales y los asimilados fotosintéticos necesarios para el desarrollo de los distintos tejidos de la cariópside. Los tegumentos del óvulo consisten en dos capas de células externas y dos internas. Los tegumentos exterior e interior degeneran un par de después de la polinización (Krishnan y Dayanandan, 2003). Las células de la nucela funcionan como transporte de asimilados al endosperma y embrión. Son críticas para el llenado del grano y están ubicadas en forma adyacente al haz vascular dorsal (Krishnan y Dayanandan 2003; Yin y Xue, 2012).

En la cariópside madura, la testa que se deriva de los tegumentos y el tejido nucelar están unidos firmemente al pericarpio (Krishnan y Dayanandan, 2003) para facilitar las interacciones fisiológicas necesarias que deben ocurrir entre los diferentes tejidos durante el llenado del grano (Wu et al., 2016a) (Figura 1).

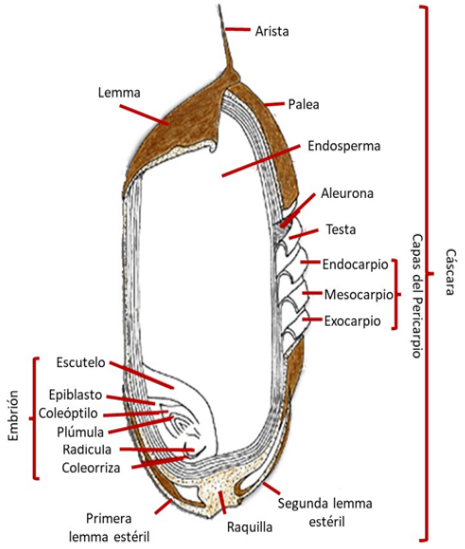


Figura 1. Estructuras de la cariópside (Adaptado de Juliano y Bechtel, 1985).

El embrión es el tejido elemental de la planta que se desarrollará después de la germinación. El embrión contiene las hojas (plúmula) y las raíces primarias (radícula) embrionales. La plúmula está incluida en el coleóptilo y la radícula en la coleorriza, los que forman el eje embrionario. Éste está encerrado por el escutelo que se ubica cerca del endospermo. Por otro lado, el coleóptilo está rodeado por el escutelo (parte apical del embrión que actúa como otro órgano de reserva para el embrión y el epiblasto, tejido vascular unido con la parte lateral del escutelo (Chang et al., 1965).

El endosperma está cubierto por la aleurona, la cual se ubica bajo el tegumento y representa el 90 % del peso total de la semilla (Murata y Matsushima, 1975; Wu et al., 2016a; 2016b). El endospermo es un tejido formado durante el proceso de madurez del grano que almacena almidón y proteínas. Sirve de nutrición para el embrión durante la germinación y el desarrollo temprano de la plántula (Kobayashi et al., 2013).

II. ESTADOS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ

El desarrollo de la planta de arroz comienza con la fecundación de la célula del huevo por el núcleo generativo del polen para formar el cigoto (huevo fertilizado). Desde la primera división del cigoto y hasta la madurez, la planta pasa por una serie de estados de crecimiento y desarrollo que se pueden agrupar de diferentes maneras (Yoshida, 1981; Counce et al., 2000; Itoh et al., 2005; Dunand y Saichuk, 2009; Moldenhauer et al., 2018). Algunos ejemplos de clasificación son: a) fase vegetativa (germinación a inicio de primordio floral), fase reproductiva (inicio primordio floral a emergencia de la panícula), y de maduración (emergencia de la panícula a madurez) (Yoshida,1981); b) embriogénesis, fase vegetativa y reproductiva, donde la fase de embriogénesis se divide en 10 estados (Em1 a Em10), la fase vegetativa en juvenil y adulta, y la fase reproductiva en nueve estados (In1 a In9) (Itoh et al., 2005); c) plántula, vegetativa y reproductiva, donde la fase de plántula se divide en varios estados (S0 a S3); vegetativa (V1 a V13), y reproductiva (R0 a R9) (Counce et al., 2000); d) fase vegetativa que va desde germinación a inicio de formación de la panícula, fase reproductiva que abarca desde el inicio de formación de la panícula a la emergencia de la panícula y el llenado del grano, y la fase de maduración que se extiende desde la emergencia de la panícula a la madurez del grano (Moldenhauer et al., 2018); e) fases vegetativa y reproductiva, donde la fase vegetativa se subdivide en emergencia, desarrollo de la plántula, macolla y elongación del tallo, y la fase reproductiva en pre-bota, bota, emergencia de la panícula, llenado del grano y madurez (Dunand y Saichuk, 2009).

Principales características de las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo descritas en la planta de arroz

a. Embriogénesis

La embriogénesis es la etapa donde se establecen el plan de desarrollo de una planta y marca un cambio de meristemas de inflorescencia a meristema floral (Hong et al., 1996; Itoh et al., 2005).

En el arroz, la polinización ocurre al mismo tiempo que la apertura de la flor (Hong et al.,1996; Itoh et al., 2005). Este proceso dura aproximadamente 15 minutos y ocurre al mediodía en el verano. La fecundación ocurre varias horas después de la polinización. Las células del cigoto se dividen, sin diferenciación morfológica aparente, para formar el embrión globular después de 3 d de la polinización. Al cuarto día ocurre la formación del meristema del tallo apical, primordio del coleóptilo y de la radícula. Al quinto día se puede reconocer el primordio de la primera hoja, para terminar con el proceso de formación del embrión con tres primordios de hojas formadas. Posteriormente el embrión entra en el proceso de maduración y dormancia (Itoh et al., 2005).

Este proceso puede durar entre 11 y 20 d desde la formación del cigoto hasta su maduración, y comprende 10 estados de desarrollo: Em1, cigoto; Em2, etapa temprana del estado globular, un día después de la polinización (DDP); Em3, estado globular mediano, dos DDP; Em4, estado globular tardío, tres DDP; Em5, diferenciación del meristema apical y de la radícula y establecimiento del coleóptilo, cuatro DDP; Em6, formación del primordio de la primera hoja, cinco a seis DDP; Em7, formación del primordio de la segunda y tercera hoja, siete a ocho DDP; Em8, alargamiento de los órganos, nueve a 10 DDP; Em9, maduración del embrión, 11-20 DDP; Em10, dormancia, 21 DDP en adelante (Itoh et al., 2005).

b. Fase vegetativa

La fase vegetativa empieza con la germinación de la semilla y termina con el inicio del desarrollo del primordio floral, cuando la planta comienza con la distribución de los asimilados a la panícula

en desarrollo. Este estado de desarrollo se caracteriza por el aumento de la altura de la planta, aparición de macollas, crecimiento de la raíz y emisión de las hojas. El proceso inicial del desarrollo de las plántulas comienza siendo heterotrófico, ya que depende totalmente del suministro de los nutrientes del endospermo, pasando luego a la fase autotrófica cuando la fotosíntesis provee los carbohidratos que requiere la planta (Fageria, 2007).

La fase vegetativa es la más larga y variable dentro del desarrollo de la planta de arroz y puede durar entre 25 y 90 d, dependiendo de la precocidad de las variedades. Las variedades precoces poseen menor período vegetativo, con una menor formación de hojas e iniciación más temprana del desarrollo del primordio floral y/o menos hojas (Itoh et al., 2005; Moldenhauer et al., 2018).

La fase se divide en cuatro estados: emergencia, plántula, macollamiento, y formación de entrenudos (Dunnand y Saichuk, 2009; Moldenhauer et al., 2018). Por otra parte, otros autores dividen la fase vegetativa de la planta en germinación de la semilla, emergencia de la plántula, pre-macolla, macolla y máxima macolla (Counce et al., 2000).

1. Emergencia

Germinación. Este proceso comienza cuando la semilla es expuesta a la humedad y temperatura requeridas para este proceso. La germinación empieza con la imbibición de agua por parte de la semilla, lo que origina un aumento de peso y volumen, y el inicio de los procesos bioquímicos que están relacionados con el crecimiento del embrión. Esta situación produce la ruptura de la cubierta seminal y los primeros signos de exposición de la radícula y la plúmula al medio externo de la semilla (Dunnand y Saichuk, 2009; Moldenhauer et al., 2018).

Cuando la semilla de arroz germina en forma aeróbica (sin lámina de agua), la primera estructura que aparece es la coleorriza y un pequeño tallo llamado mesocótilo que levanta la corona de la planta justo bajo la superficie del suelo para favorecer la emergencia del coleóptilo del cual nace la hoja primaria (prófilo). Posteriormente aparece la radícula desde el interior de la coleorriza y un par de raíces primarias.

Foto 11. Secuencia de germinación de la semilla de arroz bajo siembra directa (aeróbica) sin lámina de agua.

El mesocótilo sólo crece en la oscuridad, por lo cual no emerge en semillas sembradas bajo condiciones de inundación (Turner et al., 1982) (Foto 1). Debido a esta situación, en siembra directa es importante el crecimiento del mesocótilo y del coleóptilo para la emergencia de las plántulas. Por ejemplo, en siembras profundas la emergencia de las plántulas puede tener problemas debido a la incapacidad del mesocótilo de levantar al coleóptilo cerca de la superficie del suelo y/o del coleóptilo de alcanzar la superficie del suelo, lo que puede provocar un desarrollo deficiente o muerte de las plántulas (Turner et al., 1981; Luo et al., 2007).

En general, plántulas con mesocótilos y coleóptilos largos pueden emerger mejor que aquellas con mesocótilos y coleóptilos cortos. El largo de mesocótilo y coleóptilo está controlado genéti-

camente e influenciado por el medio ambiente (Turner et al., 1982). Las variedades semi-enanas tienen un mesocótilo corto por la presencia del alelo *sd*-1 (*semi-dwardf*-1), por lo que la profundidad de siembra de estas semillas debe ser superficial (no mayor a un cm).

Cuando la semilla germina en condiciones anaeróbicas (con lámina de agua), aparece primero el coleóptilo y, una vez que alcanza la zona aireada, emergen la coleorriza y las raíces primarias (Foto 12).

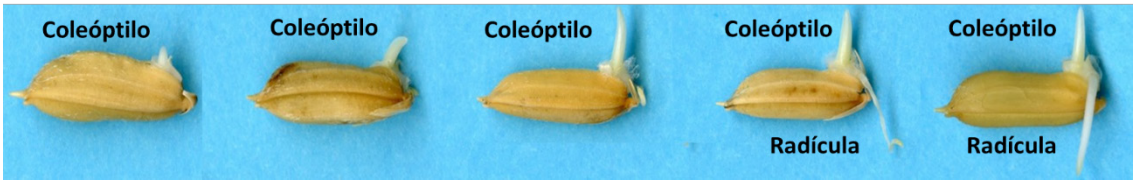


Foto 12. Secuencia de germinación de la semilla de arroz pre-germinada (anaeróbica) con lámina de agua.

Factores que afectan la germinación

Los factores externos que afectan al proceso de germinación son: la humedad, aireación y temperatura.

Temperatura. La temperatura mínima para la germinación y desarrollo varía entre 6 °C y 8 °C, la temperatura óptima alrededor de 37 °C y la temperatura máxima entre 41 °C y 44 °C (Chaudhary y Ghildyal, 1969). A temperaturas entre 27 °C y 37 °C germina entre el 90 % y 97 % de las semillas en 48 h (Yoshida, 1981), y a menos de 10 °C el proceso de germinación puede durar hasta 30 d o más. Otros estudios indican una reducción de la germinación bajo 16 °C y sobre 30 °C (Tilebeni et al., 2012).

Humedad. La semilla de arroz posee algún grado de tolerancia a las condiciones anaeróbicas (sin aireación) durante la germinación, la que está asociada a la emergencia y crecimiento parcial del coleóptilo, proceso controlado genéticamente y asociado a la fermentación alcohólica que provee la energía cuando el oxígeno no es suficiente para la respiración. Esta energía facilita la germinación de la semilla y la elongación del coleóptilo, para favorecer el crecimiento del tallo y superar la anaerobiosis (Ismail et al., 2009; 2012; Miro e Ismail, 2013; 2017). Por esta razón, en siembras con semilla pre-germinada con lámina de agua, se retira el agua para permitir que el sistema radicular seminal penetre el suelo y la plántula se arraigue (Counce et al., 2003).

Factores internos

Los diferentes procesos que ocurren durante y después de la absorción del agua por parte de la semilla, están controlados por la permeabilidad de la cubierta seminal, intercambio de gases y la actividad enzimática que ocurre dentro de la semilla (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

En el proceso de germinación de la semilla de arroz, donde el embrión se alimenta del endosperma, se pueden distinguir cuatro estados: S0, semilla seca; S1, emergencia del coleóptilo; S2, emergencia de la radícula; y S3, emergencia de la primera hoja no completa y del coleóptilo. Esta secuencia puede presentar algunas excepciones, cuando el coleóptilo emerge primero que la radícula o viceversa. En cualquiera de estos casos este estado sería S1, y cuando ambos emergen el estado es S2. Si la primera hoja emerge del coleóptilo antes que la radícula de la semilla, entonces el estado es S3 (Counce et al., 2000).

2. Plántula. La temperatura también afecta el crecimiento de la plántula, especialmente durante la primera semana para obtener una rápida tasa de crecimiento. La temperatura óptima de crecimiento está entre 22 y 31 °C (Yoshida, 1981).

Desarrollo de la plántula

Éste se inicia con la aparición de la ´primera hoja` o prófilo a través del coleóptilo, que corresponde a una hoja incompleta que no tiene lámina y está constituida por dos brácteas aquilladas. La aparición ocurre inmediatamente después de que el coleóptilo es expuesto a la luz. Luego se desarrolla la primera hoja verdadera, donde se puede diferenciar la vaina, collar (con su lígula y aurícula) y lámina, siendo considerada como una hoja completa (Foto 13).

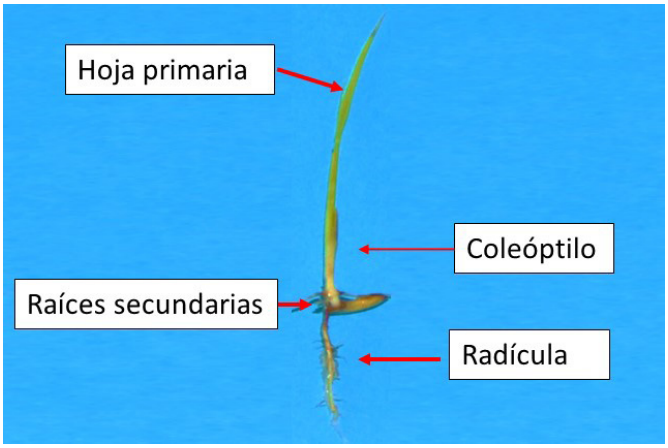


Foto 13. Plántula al estado de dos hojas.

A partir de ésta, todas las hojas posteriores son completas. La hoja bandera es la última hoja que emerge en el tallo y puede ser más ancha y corta que las hojas inferiores, como también puede crecer en diferentes ángulos con respecto al tallo (Dunand y Saichuk, 2009; Moldenhauer et al., 2018). Debido a que los largos de las hojas varían de acuerdo a su posición, las más largas son aquellas ubicadas tres o cuatro hojas bajo la hoja bandera. Las hojas erectas favorecen una mayor interceptación de la luz para la fotosíntesis y un mayor rendimiento (Moldenhauer y Gibbons, 2003). Por este motivo, la mayoría de las variedades e híbridos de arroz de alto rendimiento tienen una arquitectura erecta. Las tres hojas superiores de la planta son la principal fuente de producción de carbohidratos, de los cuales el 50 % es proporcionado por la hoja bandera (Foyer, 1987; Li et al., 1998). Dentro de este contexto, el tamaño y la forma de la hoja bandera puede afectar a la fotosíntesis y, por lo tanto, a la producción (Taguchi-Shiobara et al., 2015; Zhang et al., 2015a; Fabre et al., 2016; Wu et al., 2017).

En la estructura celular de la hoja se encuentran las estomas, células encargadas del intercambio gaseoso entre la hoja y el ambiente. El desarrollo de los estomas presenta tres estados: Sto0: determinación de la hilera de células estomáticas; Sto1: formación de las células madre guardia (CGM) por división asimétrica en la hilera de células estomáticas; Sto2: formación de un complejo de tres células, división asimétrica de las células madre subsidiarias (SMC), formación del complejo de tres células que comprende las CGM y las dos células subsidiarias; Sto3: formación del par de células estomáticas por división transversal simétrica en CGM; y Sto4: término de la formación del complejo de los estomas (Itoh et al., 2005).

Debido a que el crecimiento y desarrollo de la planta y sus estructuras son continuas, una vez que la lámina de la primera hoja se expande, el ápice de la lámina de la segunda hoja completa aparece a través de la parte superior de la vaina de la primera hoja completa. La segunda hoja crece y se desarrolla de la misma forma que la primera. El estado de dos hojas se produce cuando el segundo collar de la segunda hoja es visible sobre el collar de la primera hoja. El desarrollo de las hojas posteriores se produce igual que la primera y segunda hoja (Dunand y Saichuk, 2009).

El desarrollo de las hojas en la planta se puede dividir en seis estados que tienen las siguientes características: P0: formación de las células fundadoras de las hojas; P1: formación del primordio de la hoja y elongación de los márgenes de la hoja alrededor del meristema apical del tallo; P2: primordio en forma de campana, superposición de ambos márgenes, y diferenciación de tejidos vasculares; P3: formación del primordio de la lígula, formación del límite de la lámina de la vaina de la hoja, e iniciación de las células de la epidermis; P4: elongación rápida de la lámina de la hoja y diferenciación de las células de la epidermis; P5: elongación rápida de la hoja de la vaina, emergencia de la hoja de la vaina de la hoja precedente, y maduración de las células de la epidermis; y P6: maduración con el doblamiento de la lámina en su unión con la vaina (Itoh et al., 2005).

En el estado de emergencia de la plántula se pueden distinguir varios estados representados por el número de hojas desarrolladas. Este estado comienza con la primera hoja completa desarrollada (V1) y termina con la formación del collar de la hoja bandera. El estado V1 se define como la plántula con la primera hoja no completa (prófilo) y la emergencia de la primera hoja verdadera completamente desarrollada. Esta plántula tiene raíces del nudo del coleóptilo (Counce et al., 2000).

El estado V2 se define como la emergencia completa de la segunda hoja verdadera. Las plántulas presentan raíces adventicias que emergen del primer nudo. En este estado la planta es autotrófica, ya que el endospermo agotó sus reservas y la fotosíntesis contribuye con el 100 % de los carbohidratos al desarrollo de la planta (Yoshida, 1981). El estado V3 es la emergencia completa de la tercera hoja verdadera con la formación del collar. El estado V4 se define como el desarrollo completo de la cuarta hoja verdadera y es considerado como el término del estado de crecimiento de la plántula (Hoshikawa, 1989; Moldenhauer et al., 2018) o pre-macolla (Counce et al., 2000), ya que en el estado V5 es posible visualizar la primera macolla que emerge de la yema axilar de la segunda hoja completa del tallo principal (Counce et al., 2000).

El desarrollo de la raíz es simultáneo al del tallo. Además de la radícula (raíz primaria) aparecen otras raíces fibrosas que forman el sistema radicular primario, que es altamente ramificado y crece cercano a la semilla. El sistema radicular primario es temporal y se utiliza para proveer nutrientes y agua a la plántula que está emergiendo. En contraste, el sistema radicular adventicio es más permanente y se origina desde la base del coleóptilo, en el caso de siembra directa, y desde el mismo punto en que se originó la raíz primaria en siembras con suelo inundado. El sistema radicular adventicio provee nutrientes y agua durante el resto del período vegetativo de la planta (Dunand y Saichuk, 2009).

La fase vegetativa se puede dividir en tres estados: juvenil, intermedio y adulto. En la fase juvenil la planta posee la primera y la segunda hoja, en el intermedio la planta tiene entre cinco y siete hojas, y en el estado adulto las plantas tienen más de siete hojas (Itoh et al., 2005).

Aireación. Aproximadamente a los 20 d de la emergencia de la plántula, ésta ha iniciado el proceso de desarrollo de conductos de aire en las hojas y raíces. Por ello es posible iniciar el riego del cultivo de arroz en forma de lámina continua o permanente. Dentro de las 24 h siguientes a que el suelo ha sido inundado, el oxígeno disponible es consumido por las bacterias aeróbicas que buscan oxidantes (Ponnamperuma, 1972). Por lo tanto, la planta queda viviendo en condiciones de suelo con bajo oxígeno (hipoxia) después de 1 d de inundación. Sin embargo, la raíz necesita oxígeno para crecer y desarrollarse. El tejido capaz de conducir el oxígeno es el aerénquima, formado por tejidos muertos dentro de la planta, destinados a producir grandes espacios intercelulares (Drew et al., 2000). Este proceso ordenado de muerte de las células para formar el aerénquima se conoce como ´muerte programada de células`, el cual es constitutivo en el arroz y ocurre en respuesta a ciertos estímulos recibidos por la planta (Evans, 2003; Steffens et al., 2011). Después del período de inundación se induce una mayor formación de aerénquima que conduce el oxígeno a las raíces de la planta de arroz, por una corriente continua de difusión del oxígeno desde las hojas al tallo a través de nudos y entrenudos (Counce et al., 2003). En el tallo, el desarrollo sustancial del

aerénquima sólo se puede lograr a los tres de la inundación. Este desarrollo se produce a partir de células pre-aerenquimales del parénquima celular que contienen vacuolas grandes y poco citoplasma (Steffens et al., 2011). A nivel histológico, se observa en cada entrenudo del tallo un gradiente positivo de formación de espacios de aire de origen lisígeno, desde la base del nudo hacia arriba del mismo, mientras que en el nudo no se observa aerénquima y el oxígeno es difundido de un entrenudo a otro a través de los espacios intercelulares (Steffens et al., 2011).

Macolla

La macolla (macollo) aparece como una punta de hoja en la parte superior de la vaina de las hojas completamente desarrolladas en el tallo principal, debido a que las macollas se originan de una yema axilar ubicada dentro de la vaina de la hoja, ligeramente más arriba del lugar donde la vaina se sujeta a la planta. Las macollas que se originan del tallo principal se llaman macollas primarias (Dunand y Saichuk, 2009).

La emergencia de las macollas está estrechamente asociada a la formación de las hojas. La primera macolla ocurre aproximadamente en el estado V5 de la yema axilar de la segunda hoja completa (Murata y Matsushima, 1975; Counce et al., 2000). Las macollas pueden emerger en forma alternada como las hojas sobre el tallo principal. Incluso ante una baja densidad de población se pueden originar macollas desde las macollas primarias, siendo consideradas como macollas secundarias. El desarrollo de las macollas y raíces es más tardío que el de las hojas. Es así como por cada hoja (n) que emerge del tallo principal, nace una macolla de la yema axilar (n - 3) de la hoja (Counce et al., 2000; Moldenhauer y Gibbons, 2003).

Las macollas crecen y se desarrollan de la misma manera que el tallo principal, pero tienen un desarrollo más retrasado debido a su aparición más tardía. Por ello, las macollas producen menos hojas, tienen menos peso y maduran un poco más tarde que el tallo principal (Dunand y Saichuk, 2009) (Foto 14).

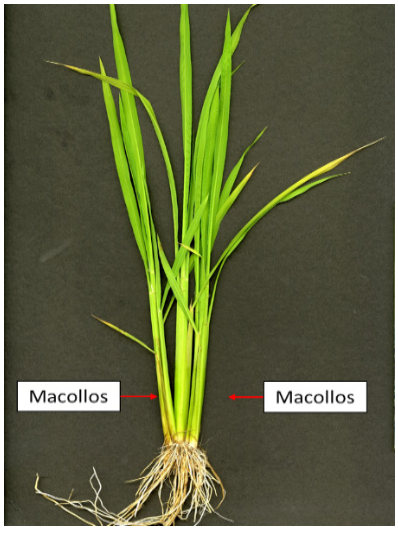


Foto 14. Planta de arroz con varias macollas.

El número de macollas puede variar entre variedades, precocidad y factores agronómicos, como densidad de planta, fertilidad del suelo, control de malezas y sistema de siembra (Fageria et al., 2011). Un número excesivo de macollas no es recomendable, debido al excesivo aumento del área foliar, mayor sombreamiento entre las plantas, mayor número de macollas sin panojas o con panojas muy pequeñas, mayor desuniformidad a la cosecha, y un menor rendimiento. Por otro lado, un bajo número de macollas también afecta el rendimiento, debido a la menor capacidad

de compensar bajas poblaciones de plantas establecidas a la siembra, lo que implica un menor número de panojas por superficie. Por otro lado, la formación de macollas tardías puede reducir el porcentaje de grano entero, al favorecerse el quiebre de granos inmaduros provenientes de las macollas tardías, reduciendo la calidad industrial. Las tres primeras panículas de las macollas maduran al mismo tiempo que la del tallo principal, pero macollas adicionales pueden madurar más tarde, aumentando la desuniformidad de cosecha y el rendimiento industrial (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Moldenhauer et al., 2018).

El número de plantas y número de macollas por planta determinan el número total de macollas por superficie, produciéndose un efecto compensatorio entre ambos. En siembras densas las plantas producen menos macollas (dos a tres macollas) que en siembras menos densas (cinco o más macollas). Algo similar ocurre con el número de macollas y el tamaño de la panícula. Pocas macollas producen panículas más grandes y muchas macollas producen panículas o panojas más pequeñas (Moldenhauer et al., 2018).

Durante la etapa de macolla, en la base del tallo se empieza a desarrollar la corona. La corona está conformada por brotes y raíces secundarias. Dentro de la corona se forman nudos, al mismo tiempo que se desarrolla cada hoja. Estos nudos aparecen como bandas de color blanco, paralelas a la superficie del suelo. Al principio los nudos son contiguos y sólidos entre sí, pero con el tiempo se van desintegrando y dejando una separación entre ellos. A medida que se forman nuevas hojas, se forman nuevos nudos en la corona principal del tallo, quedando al final entre siete u ocho entrenudos visibles (Dunand y Saichuk, 2009). Durante este período, además del desarrollo de la corona, se desarrollan también hojas nuevas (5-6) y un número mayor de raíces.

Raíces de la corona

El desarrollo de las raíces de la corona es un proceso complejo que se puede dividir en siete etapas: Cr1: establecimiento de las células originales, primordio de la raíz de la corona por la división periclinal del meristema; Cr2: formación de la epidermis-endodermis, cilindro central de la capa de células meristemáticas interiores y la caliptra (punta) de la raíz de la capa de células meristemáticas exteriores; Cr3: diferenciación de epidermis y endodermis de las células iniciales epidermales-endodermales; Cr4: diferenciación de la corteza por división periclinal de las células de la endodermis; Cr5: establecimiento de la organización fundamental de la raíz, donde la punta de la raíz alcanza la epidermis del tallo; Cr6: establecimiento de la elongación de las células y vacuolación, las células ubicadas en la región basal comienzan su elongación; y Cr7: emergencia de la raíz de la corona, elongación de las células basales de todos los tejidos y emergencia de la corona de la raíz fuera del tallo (Itoh et al., 2005).

A medida que avanza el crecimiento de la planta, en el tallo principal algunas de las hojas más viejas se tornan amarillas y necrosan. Dentro de la hoja, el cambio de color se inicia en el ápice de la lámina hacia la base. Este proceso de senescencia se produce desde la parte baja de la planta, donde están las hojas más viejas, hacia arriba de la planta donde se encuentran hojas más nuevas. Este proceso de senescencia estimula la producción de nuevas hojas, lo que implica que en el tallo hay siempre entre cuatro o cinco hojas completas, totalmente funcionales. Hojas que presentan una senescencia más tardía favorecen un mejor llenado del grano y mayor rendimiento, ya que permiten una mayor actividad fotosintética y movilización de nutrientes desde las hojas al grano (Dunand y Saichuk, 2009; Fageria et al., 2011).

En el estado de macolla se pueden diferenciar tres estados: pre-macolla, macolla, y macolla máxima (Moldenhauer et al., 2018).

La pre-macolla se define como el período comprendido entre la primera (V1) y la cuarta hoja (V4), durante el cual se desarrollan más raíces adventicias, en un periodo de entre 15 y 25 d (Moldenhauer et al., 2018).

La macolla emerge desde el brote axilar de la segunda hoja en el tallo principal y generalmente comienza en la quinta hoja (V5) y continúa hasta la sexta hoja (V6). Es así como la segunda macolla emerge del brote axilar de la tercera hoja del tallo principal. Las raíces adventicias crecen hacia abajo hasta la inundación, donde posteriormente crecen en forma vertical y lateral (Moldenhauer et al., 2018).

En macolla máxima éstas aumentan en forma sigmoidal hasta alcanzar su número máximo. En este momento es difícil distinguir el tallo principal de las macollas. El número de macollas depende de factores genéticos y ambientales, pudiendo variar de dos a cinco en siembra directa y entre 10 y 30 en siembra por trasplante (Moldenhauer et al., 2018).

Durante este período se define el primer componente del rendimiento, como es el número de macollas por superficie. También durante este estado de desarrollo se realizan importantes prácticas agronómicas, como la aplicación de nitrógeno, control de malezas y manejo adecuado del agua, dependiendo del sistema de siembra.

Fase reproductiva

La fase reproductiva comprende el período desde el inicio del primordio de la panícula hasta la antesis. Este estado se caracteriza por la elongación del tallo, reducción en el número de macollas, diferenciación de la panícula, tamaño y número de espiguillas por panícula, emergencia de la hoja bandera y floración (Moldenhauer et al., 2018). Se distinguen dos escalas fenológicas para caracterizar el estado reproductivo: Dunand y Saichuk (2009) y Counce et al. (2000).

Según Moldenhauer et al. (2018) el estado reproductivo de la planta se puede dividir en 10 etapas (R0 a R9): R0 representa el inicio del primordio de la panícula; R1, las ramas de la panícula están formadas; R2, formación del collar en la hoja bandera; R3, excersión de la panícula de la bota y la punta de la panícula está sobre el collar de la hoja bandera; R4, una o más flores de la panícula del tallo principal alcanzan la antesis; R5, al menos un grano (fruto) de la panícula en el tallo principal se está empezando a elongar en el extremo de la cáscara; R6, al menos un grano (fruto) de la panícula en el tallo principal está elongado; R7, al menos un grano de la panícula del tallo principal tiene una cáscara amarilla; R8, al menos un grano de la panícula del tallo principal tiene una cáscara café; y R9, donde todos los granos han alcanzado su elongación (R6) y tienen cáscara café (Counce et al., 2000).

R0. Inicio formación del primordio de la panícula. La temperatura juega un rol importante en el inicio y desarrollo de la inflorescencia del arroz. Para dar comienzo a este proceso, el arroz necesita acumular una cantidad específica de grados de temperatura (grados) que incentivan la formación de la panícula y la floración. Durante su desarrollo, la temperatura puede acelerar o retardar el crecimiento de la planta. Las temperaturas bajas durante el período de floración pueden afectar la viabilidad del polen y/o del óvulo, y aumentar la esterilidad floral y disminuir el rendimiento final del grano (Arshad et al., 2017). Así, cuando las condiciones ambientales y los factores internos son favorables para la inducción floral, el meristema apical del tallo, que estaba formando hojas y macollas, se convierte en meristema de la inflorescencia y se diferencia la panícula. Este nuevo meristema forma las bractéolas (hojas pequeñas que degeneran) y las ramas de la inflorescencia que van a formar las flores (espiguillas) más tarde (Itoh et al., 2005).

El inicio de la formación del primordio de la panícula comienza cuando las células del meristema apical comienzan a dividirse activamente, lo que ocurre aproximadamente 5 semanas antes de la emergencia de la panoja, dependiendo de la precocidad de las variedades. El inicio de la formación de la panícula no es visible a simple vista y el primer signo visible es la formación del ´anillo verde` en el entrenudo más bajo, previo a la elongación (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Dunand y Saichuk, 2009). En variedades muy precoces el inicio de la formación de la panícula, elongación del entrenudo y formación del anillo verde, ocurren casi al mismo tiempo. En variedades precoces,

el inicio de panícula ocurre simultáneamente con la elongación del segundo entrenudo. En variedades de media estación la iniciación de la panícula ocurre con la elongación del tercer entrenudo (Dunand y Saichuk, 2009).

En el desarrollo de la espiguilla se pueden distinguir ocho estados en los cuales ocurren actividades específicas: Sp1: formación de un par de primordios de glumas rudimentarias; Sp2: formación de un par de primordios de glumas vacías; Sp3: formación del primordio de la lemma; Sp4: formación del primordio de la pálea; Sp5: formación del primordio del lodículo; Sp6: formación del primordio del estambre; Sp7: formación del primordio del carpelo; y Sp8: formación del óvulo y el polen (Itoh et al., 2005).

El óvulo es el órgano reproductivo femenino donde ocurre la megasporogénesis, megagametogénesis, fertilización y embriogénesis (Itoh et al., 2005). El desarrollo del óvulo está controlado genéticamente (Gasser et al., 1998) y en este proceso se pueden distinguir varios estados (Itoh et al., 2005). Los principales estados son: Ov1: diferenciación del primordio del óvulo donde el largo de la inflorescencia (LI) puede variar entre 0,3 y 1 cm; Ov2: diferenciación de los integumentos del primordio, formación lóculo del ovario, aumento de volumen de células antipodales (AC), con un LI de 1 a 3 cm; Ov3: división de los integumentos del primordio, diferenciación de célula madre de la megaspora (MMC), y LI puede variar entre 3 y 5 cm; Ov4: meiosis MMC, elongación de los integumentos, formación de la micrópila, y LI entre 5 y 7 cm; Ov5: degeneración de tres esporas micropilares, elongación de los integumentos, y LI de 7 a 10 cm; Ov6: primera división mitótica nuclear, primera división mitótica celular de la chalaza, establecimiento de la inclinación del óvulo, y LI entre 10 y 12 cm; Ov7: segunda división mitótica nuclear, formación de la vacuola en el megagametofito, y LI entre 12 y 14 cm; Ov8: tercera división mitótica nuclear con resultado de ocho megagametofitos nucleados, y LI que varía entre 14 y 16 cm; Ov9: polarización del núcleo, término de la inclinación del óvulo, y LI que fluctúa entre 16 y 18 cm; y Ov10: donde ocurre la maduración (Itoh et al., 2005).

En el desarrollo de la antera pueden ocurrir diferentes actividades que se pueden agrupar en diferentes estados. An1: formación de las ACs hipodermales, diferenciación de las ACs en los cuatro costados de la hipodermis de la antera, largo de la antera (LA) aproximado entre 0,1 y 0,15 mm; An2: formación de la capa de la pared de la antera, división periclinal de la hipodermis para formar las diferentes capas de la estructura de la pared de la antera, LA entre 0,15 y 0,3 mm; An3: término de formación de las capas de la pared de la antera, establecimiento de células madre del polen (PMCs) y cuatro capas de la pared de la antera, síntesis pre-meiótica de ADN en PMCs, y LA puede variar entre 0,3 y 0,5 mm; An4: meiosis, con un LA de 0,45 a 0,95 mm; An5: formación de cuatro esporas (tétradas) haploides, establecimiento del endotecio y degradación de la capa media, y LA entre 0,8 y 1,1 mm; An6: formación del gametofito uninucleado, formación de la microspora esférica aumentada de tamaño, formación de la exina, intina y poro para la germinación del polen, y LA que varía entre 1,1 y 2,2 mm; An7: formación del gametofito binucleado, formación del núcleo vegetativo y generativo por la mitosis I del polen, con LA de 2,2 mm; An8: formación del polen maduro, formación de dos núcleos espermáticos por la mitosis del núcleo generativo, y LA de 2,2 mm (Itoh et al., 2005).

El paso de R0 a R1 toma alrededor de 20 a 30 d (Moldenhauer et al., 2018). El momento R0 da inicio a la elongación de entrenudos que se mantiene hasta antesis en R4.

R1. Las ramas de la panícula están formadas. Después de 5 a 10 d de iniciado el proceso de formación de la panícula, la panícula inmadura que está en proceso de diferenciación puede ser visualizada dentro del tallo.

La diferenciación de la panícula se define cuando ésta es visible, es decir, cuando mide 1 a 2 mm de largo, el entrenudo por debajo se ha elongado en 1 a 2 cm, y los puntos de crecimiento de las ramas de la panícula se empiezan a diferenciar en flores (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

La formación de las flores comienza primero en las ramas ubicadas en la parte superior de la panícula y progresa hacia abajo, pero como hay varias ramas, el desarrollo de las flores se sobrepone. Las flores ubicadas en la punta de las ramas bajas pueden estar más avanzadas en su desarrollo

que las flores ubicadas cerca de la base de las ramas de la panícula de la parte superior (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Dunand y Saichuk, 2009). En este estado se fija el segundo componente de rendimiento, el número de granos por panícula.

En este estado de desarrollo, la panícula con sus ramas y flores pueden ser observadas usando lentes de aumento o un microscopio.

El desarrollo de la inflorescencia se puede dividir en nueve estados que comprenden diferentes etapas (Foto 15): In1: establecimiento del raquis, conversión del meristema vegetativo a meristema del raquis, elongación del raquis, formación del primordio de la bráctea 1, tamaño de la inflorescencia (TI) es de 0,05 a 1,00 mm; In2: formación de la rama primaria I y II, el raquis alcanza el máximo tamaño, formación de los meristemas de las dos ramas primarias y primordio de las brácteas 2 y 3 y TI es de 0,1 a 0,2 mm; In3: formación de las ramas primarias III, formación del primordio en espiral de la rama primaria, aborto del meristema del raquis al final del período; TI alcanza entre 0,2 y 0,4 mm; In4: elongación de las ramas primarias en forma simultánea, TI varía entre 0,4 y 0,6 mm; In5: formación de ramas de orden superior, formación de ramas secundarias y terciarias, establecimiento de la elongación del nudo superior del tallo, TI llega entre 0,6 y 0,9 mm; In6: diferenciación de las dos glumas rudimentarias, dos glumas vacías, lemma y pálea en orden alternado, TI de 0,9 a 1,5 mm; In7: diferenciación de los órganos florales, dos lodículos, seis estambres y el carpelo en espiral, TI alcanza entre 5 y 40 mm; In8: elongación rápida del raquis y ramas, término del desarrollo de las anteras y el óvulo, TI varía entre 40 y 220 mm; e In9: emergencia de la panoja y floración, emergencia de la panoja fuera de la vaina de la hoja bandera a mediodía (Itoh et al., 2005).

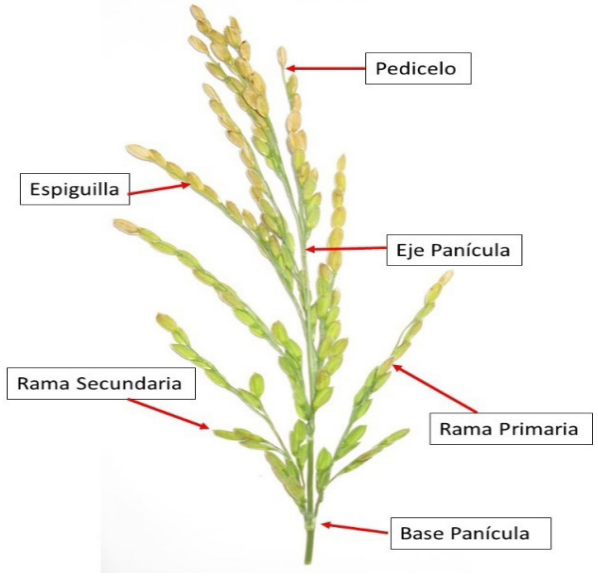


Foto 15. Panícula de arroz y sus principales estructuras desarrolladas.

R2. Formación del collar en la hoja bandera. Este estadio corresponde al momento de expansión de la hoja bandera y comprende eventos superpuestos de la microsporogénesis y la continuación de la elongación de entrenudos. A medida que el entrenudo se alarga, se empieza a acumular clorofila bajo el nudo del tallo, produciéndose un área verde conocida como ´anillo o banda verde`. Este proceso marca el inicio de la elongación del tallo y el cambio del estado vegetativo al reproductivo de la planta. Este proceso de formación de nudos y entrenudos continúa uno sobre otro, aumentando el largo del tallo y la altura de la planta (Dunand y Saichuk, 2009). En las variedades tardías, la elongación de los entrenudos comienza antes de la iniciación de

la formación de la panícula. Sin embargo, en variedades semi precoces o precoces la elongación de los entrenudos coincide con el proceso de formación de la panícula (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

El tiempo entre siembra y formación de entrenudos depende de la precocidad de la variedad, fecha de siembra, densidad de plantación, fertilidad del suelo, disponibilidad de agua y control de malezas (Dunand y Saichuk, 2009).

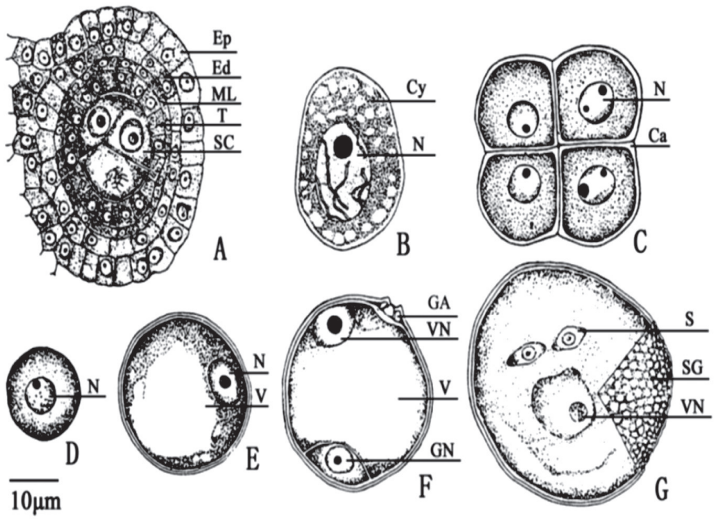
La aparición de los nudos sobre la corona marca un cambio en el rol de los nudos como punto de origen de varias partes de la planta. Antes que se inicie el período de formación de los entrenudos sobre la corona, todas las hojas, tallos y raíces secundarias se originan de los nudos de corona. Después de la formación de los entrenudos sobre la corona, los nudos del tallo sirven como punto de origen de todas las hojas posteriores. En muchas variedades se producen, aproximadamente, 6 hojas en el tallo principal posterior a la elongación de los entrenudos. La última hoja es llamada hoja bandera. La vaina de la hoja incluye a la panícula durante la elongación de los dos últimos entrenudos (Dunand y Saichuk, 2009).

Durante la elongación del tallo se observa un mayor crecimiento radicular que en el período de emergencia, alcanzando su máxima longitud al inicio del desarrollo de la panícula. Este crecimiento radicular puede verse afectado por la aireación del suelo. Bajo condiciones aeróbicas y de suelo profundo, la raíz puede alcanzar 1 m o más de longitud. Sin embargo, bajo condiciones anaeróbicas y de suelo más arcilloso, el crecimiento de la raíz es menor, menos profunda y más horizontal, y puede alcanzar una longitud no mayor a 40 cm (Dunand y Saichuk, 2009; Fageria et al., 2011).

El desarrollo de las hojas después de la iniciación de la formación de la panícula puede tener diferentes formas, ángulos, y colores en comparación a su desarrollo durante la fase vegetativa. Hojas largas en el estado vegetativo pueden tener alguna ventaja, ya que favorecen el establecimiento y la competencia con las malezas. Hojas erectas interceptan mejor la luz y reducen el sombreado dentro de la canopia, lo que favorece un mayor rendimiento. El sombreado durante la etapa reproductiva puede aumentar la esterilidad de la panícula, el aumento del largo de los entrenudos, favorecer la tendedura, y la reducción del rendimiento (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

La microsporogénesis ocurre antes de la excersión de la panícula, específicamente cuando el polen se diferencia. Este proceso está asociado al movimiento de la hoja bandera (Yoshida, 1981). La meiosis comienza cuando la aurícula de la hoja bandera está 3 cm bajo la aurícula de la penúltima hoja. La aurícula de la hoja bandera está todavía dentro de la vaina, pero la lámina de la hoja está parcialmente emergida. El término de la meiosis coincide con el momento en que la aurícula de la hoja bandera está a 10 cm sobre la aurícula de la penúltima hoja, sin que se haya extendido totalmente (Arshad et al., 2017).

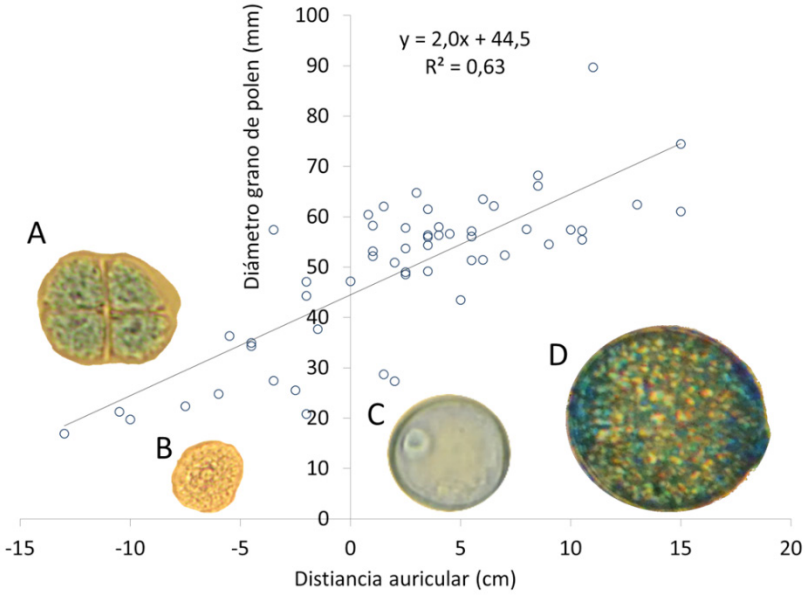
En la meiosis de la antera ocurren los siguientes eventos (Figura 2): Mei1: S/G_2 pre-meiótica, síntesis específica de ADN, largo de la antera (LA) entre 0,02 y 0,45 mm; Mei2: leptoteno, iniciación de la condensación de los cromosomas meióticos, asociación de elementos laterales (LEs) a los ejes de los cromosomas, y LA entre 0,40 y 0,55 mm; Mei3: zigoteno, establecimiento de los componentes centrales de los ejes de los cromosomas homólogos, y LA que puede variar entre 0,45 y 0,65 mm; Mei4: paquiteno, término de la formación del complejo sinaptonémico (SC), recombinación de los cromosomas homólogos, y LA que fluctúa entre 0,6 y 0,8 mm; Mei5: diploteno, degradación del SC, y LA entre 0,75 y 0,85 mm; Mei6: diacinesis, ruptura de la envoltura nuclear, desaparición de los nucleolos, y LA entre 0,7 y 0,9 mm; Mei7: metafase I, alineación de los pares de cromosomas homólogos en el plano ecuatorial, y LA entre 0,8 y 0,9 mm; Mei8: anafase I/telofase I, división reduccional de cada homólogo, y LA entre 0,8 y 0,9 mm; Mei9: intercinesis (profase II), formación de células madres y núcleos, y LA entre 0,8 y 0,9 mm; Mei10: metafase II, alineamiento de los pares de cromátidas en el plano ecuatorial, y LA entre 0,8 y 0,9 mm; Mei11: anafase II/telofase II, división ecuatorial de cada cromátida hermana, y LA entre 0,8 y 0,9 mm; Mei12: formación de la tétrada, cuatro esporas haploides (Itoh et al., 2005).



Fuente: Yang, 2005.

Figura 2. Microsporogénesis. A) Esquema de corte transversal de un lóbulo de antera con esporocitos en su interior; B) célula madre de microspora; C) tétrada; D) microspora temprana; E) microspora tardía; F) grano de polen bicelular; G) grano de polen maduro. Ep: epidermis; Ed: endotecio; ML: capa media; T: tapetum; SC: esporocitos; Cy: citoplasma; N: núcelo; Ca: callosa; V: vacuola, GA: apertura de germinación; VN: núcleo de célula vegetativa; S: célula espermática; SG: grano de almidón.

Un estudio realizado en diferentes variedades chilenas de arroz en relación al diámetro del grano de polen y la distancia auricular se muestra en la Figura 3.



Fuente: Donoso et al., 2013.

Figura 3. Relación entre el diámetro del grano de polen y la distancia auricular. La correlación se realizó utilizando las variedades comerciales ´Ámbar-INIA`, ´Brillante-INIA`, ´Buli-INIA`, ´Diamante-INIA` y ´Zafiro-INIA`. A, corresponde a estado de tetrada; B, a microspora temprana; C, a microspora tardía; y D a grano de polen maduro.

Este período de formación de la panícula es muy sensible a factores ambientales como temperaturas extremas, sequía, deficiencia de nutrientes o toxicidades, los que pueden reducir el número de ramas por panícula y/o espiguillas, y aumentar la esterilidad (Moldenhauer y Gibbons, 2003; Arshad et al., 2017).

R3. Excersión de la panícula. La excersión de la panícula se debe a la elongación del último entrenudo del tallo. A medida que el entrenudo se alarga, empuja a la panícula a emerger de la vaina. Cuando se termina la elongación del último entrenudo, la panícula expone su máximo tamaño con una porción del último entrenudo sobre el collar de la hoja bandera. La emisión de la panoja del tallo principal es anterior al de las macollas. El período de emergencia de la panícula es variable dentro y entre las plantas, y puede durar desde 4 a 5 d hasta 10 a 14 d (Dunand y Saichuk, 2009).

Agronómicamente se considera 50 % de emergencia de la panícula, cuando el 50 % de las panículas de los tallos de una muestra tiene un rango desde aquellas recién emergidas a completamente emergidas (Dunand y Saichuk, 2009).

El grado de excersión de la panícula es controlado genéticamente y la excersión completa de la panícula es una característica deseada en los programas de mejoramiento genético.

Existe una relación inversa entre el largo de la panícula y el número de panículas por superficie. El tamaño de la panícula es una característica determinada genéticamente e influenciada por el medio ambiente. Desde el punto de vista agronómico, la panícula compacta puede presentar un mayor rendimiento en comparación a una no compacta, y una panícula completamente excerta de la vaina de la hoja bandera es más difícil de trillar que una parcialmente excerta.

La panícula del arroz está compuesta de un gran número de espiguillas y cada espiguilla es considerada como una unidad en la inflorescencia (Mohapatra y Sahu, 1991). Durante el desarrollo de la panoja, el desarrollo de las ramas primarias en el raquis es basipétala, desde arriba hacia abajo, y el desarrollo de las espiguillas es acropétala con excepción de una en la punta de la rama que florece primero (Xu y Vergara, 1986). La cáscara, o sea el largo y ancho de la lemma y la pálea, alcanza su máximo tamaño 8 a 5 antes de la emergencia de la panoja, y posterior a la floración el grano sólo aumenta de peso (Nakatomo et al., 1987) (Foto 16).

Foto 16. Panícula formada por tercios. El llenado de granos comienza desde el tercio superior y hacia abajo.

R4. Una o más flores de la panícula del tallo principal alcanzan la antesis. La antesis comienza con la excersión de la panícula o al día siguiente. A medida que la panoja emerge, las espiguillas de la parte superior de la panícula comienzan a florecer y continúa en forma descendente.

La antesis se refiere al evento de apertura y cierre de la espiguilla (Foto 17). Durante este estado la espiguilla se abre producto del movimiento de los lodículos ubicados en el interior de la flor. Los filamentos de las anteras se alargan y son excertados y expuestos fuera de la espiguilla, dejando visible el filamento del estigma plumoso. Las anteras se abren y el polen cae en el estigma, donde el tubo polínico germina y se alarga para conectar el ovario e insertar un gameto masculino en el núcleo del huevo (2n, embrión) y el otro gameto masculino se une a dos núcleos polares (3n, endosperma) (Hoshikawa, 1989), produciéndose por autopolinización una doble fertilización. Posteriormente, la espiguilla se cierra, dejando a las anteras fuera de ella. El polen es viable por 10 min después de la apertura de las anteras, mientras que el estigma se puede fertilizar por 3 a 7 d. La fertilización del óvulo por el grano de polen se puede completar en 5 a 6 h después de la polinización, dando paso a la formación del grano (Moldenhauer y Gibbons, 2003).

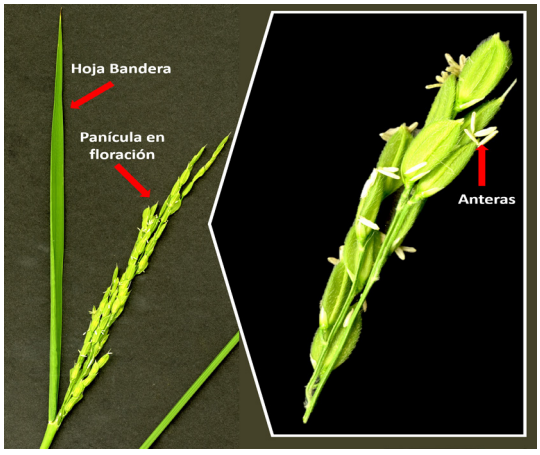


Foto 17. Antesis en arroz.

Este proceso puede durar entre 1 a 2,5 h, lo que generalmente ocurre entre 09:00 y 14:00 h pudiendo tomar entre 7 y 10 d para que todas las espiguillas en la panícula completen la floración. En nublados y en con bajas temperaturas, la antesis puede ocurrir más tarde y tomar más tiempo; incluso puede inhibirse a temperaturas menores a 22 °C o superiores a 32 °C, causando esterilidad floral (Dubey et al., 2018).

Aunque el arroz es una planta de autopolinización, el porcentaje de polinización cruzada puede variar entre 0,5 % y 4,0 %, siendo mayor en el arroz tipo *indica* que en el *japonica* (Oka, 1988).

R5. Al menos un grano (fruto) de la panícula en el tallo principal se está empezando a elongar en el extremo de la cáscara, y R6, al menos un grano (fruto) de la panícula en el tallo principal está elongado. Desde el punto de vista agronómico, los estados R5 y R6 se podrían considerar como ´llenado de grano`. El llenado del grano se extiende desde la floración hasta la madurez fisiológica del grano. El llenado del grano está determinado por factores genéticos y ambientales como temperatura, radiación solar, humedad, nutrición, y presencia de enfermedades y plagas. Durante este período, que puede durar entre 25 y 30 d, el peso del grano aumenta rápidamente, dependiendo de las condiciones climáticas y de la variedad. Es así como el llenado del grano de los arroces tipo *japonica* es relativamente más largo que el del tipo *indica*.

La formación del grano resulta, principalmente, de la acumulación de carbohidratos. La primera fuente de carbohidratos es la fotosíntesis que ocurre en las 3 a 4 hojas superiores de la planta (Dunand y Saichuk, 2009), especialmente en la hoja bandera. Los carbohidratos acumulados en el grano se almacenan en forma de almidón en el endospermo (Zhou et al., 2017).

El endospermo es una estructura muy importante en el arroz y otros cereales, ya que almacena nutrientes como almidón, proteínas, vitaminas, minerales necesarios para la germinación del embrión (Sabelli y Larkins, 2009).

El endosperma se forma a través de varios procesos después de la doble fertilización, división celular (2 después de la fertilización, DDF), separación del endosperma multinuclear en células individuales (3-5 DDF), diferenciación de la aleurona en almidón (6-9 DDF) y acumulación de los productos almacenados (21 DDF) que termina con la programación de la muerte celular (Kobayashi et al., 2013; Wu et al., 2016a; 2016b) y cambios en la permeabilidad de la membrana citoplasmática en el centro del almidón del endosperma, debido, probablemente, a la programación de la muerte celular (8 DDF), extensión de la pérdida de la permeabilidad celular a todo el endosperma (21 DDF) y formación de diferentes capas de aleurona (Wu et al., 2016b).

Debido a que en este estado se definen dos componentes de rendimiento como son el número y peso de los granos que contribuyen a definir el rendimiento, es importante mantener una gran cantidad de hojas fotosintéticamente activas, ya que los nutrientes almacenados en las hojas serán movilizados a la panícula y granos para su desarrollo (Makino, 2011; Zhang et al., 2017a; Wang et al., 2018). El llenado del grano es producto del incremento en el número y tamaño de las células en el endospermo.

En arroz, aproximadamente el 85 % de los granos se llenan, un porcentaje variable (15 % a 20 %) de granos quedan sin llenar (estériles o vanos). El porcentaje de granos estériles puede variar por factores genéticos y debido a condiciones ambientales como temperaturas extremas (Arshad et al., 2017), baja radiación solar, estrés hídrico y problemas nutricionales (Yoshida, 1981).

El endospermo y el embrión, que constituyen el tejido filial, están aislados del tejido maternal (pericarpio, placenta, tejido vascular, chalaza y núcleo) debido a la ausencia de continuidad simplástica. Durante el llenado del grano, los nutrientes son transportados al endospermo a través del tejido vascular del óvulo presente en el lado ventral del ovario. Al comienzo, los solutos entran a través de la chalaza y posteriormente al endospermo. En estados más tardíos, el transporte de solutos ocurre a través de la epidermis nucelar en forma centrípeta hacia el endospermo (Krishnan y Dayanandan, 2003).

Cuando el llenado del grano termina, se detiene el proceso de translocación de carbohidratos a la panícula y ésta comienza a cambiar de color, desde verde hacia el café claro.

La ausencia de sincronización en el desarrollo de las espiguillas causa variaciones en la calidad y el peso de los granos (Mohapatra y Sahu, 1991; Yang et al., 2000). En general, las espiguillas que florecen primero, ubicadas en la parte apical de las ramas primarias, se llenan rápido y producen granos más grandes y pesados. En tanto, espiguillas inferiores, ubicadas en la proximidad de ramas secundarias, son estériles o se llenan lentamente, produciendo granos de baja calidad (Xu y Vergara, 1986; Mohapatra et al., 1993; Naik y Mohapatra, 1999). El lento llenado del grano y el bajo peso del grano de las espiguillas inferiores, se han atribuido a la limitación de carbohidratos y a la relación entre ácido abscísico (ABA) y etileno. En este sentido, se postula que se necesita alta concentración de ABA en relación a etileno en las espiguillas de arroz para mantener una alta tasa de llenado de grano (Yang et al., 2006). Por otro lado, la forma de la panícula de arroz también condiciona el llenado de granos. Así, el nuevo ideotipo (tipo ideal de planta), con gran densidad y cantidad de granos que forman las panojas compactas, tendrían una gran variación en la tasa de llenado de granos como consecuencia de una limitación de la fuente, en comparación con ideotipos de panojas laxas (Wang et al., 2006).

R7. Al menos un grano de la panícula del tallo principal tiene una cáscara amarilla. Este estado es acompañado por el inicio de la senescencia de las hojas y raíces. En este estado, las cinco hojas superiores de la planta, que suministraron gran parte de los carbohidratos y otros nutrientes para el llenado y madurez del grano, pueden empezar a envejecer, aunque en algunas variedades las hojas superiores pueden permanecer verdes durante todo este período.

En esta instancia el grano empieza a sufrir diferentes cambios internos y en su apariencia física que se pueden resumir en: 1) lechoso (R6), el desarrollo de los granos de almidón es blanco y de apariencia lechosa; 2) harinoso blando (R6), el almidón comienza a endurecerse, pero aún es blando; 3) harinoso duro (R7), todo el grano es firme y el contenido de humedad es mayor a 20 %; y 4) maduro (R9), grano firme y contenido de humedad menor a 20 % (Yoshida, 1981; Moldenhauer y Gibbons, 2003).

R8. Al menos un grano de la panícula del tallo principal tiene una cáscara café, y R9, todos los granos que han alcanzado su completa elongación (R6) tienen la cáscara color café. El proceso de madurez comienza 3 semanas después de la fertilización y se extiende, aproximadamente, 30 a 60 d, siendo acompañado por la senescencia de las hojas. Este proceso depende de las variedades y de las condiciones climáticas como la temperatura. Así, en zonas tropicales puede durar 30 d, mientras que en zonas templadas hasta 60 d (Yoshida, 1981).

Durante el proceso de maduración del grano, la morfogénesis de la planta está casi completa y los carbohidratos están almacenados en los granos en forma de almidón (Dunand y Saichuk, 2009).

La madurez fisiológica se define como el estado en que el proceso de translocación de los carbohidratos desde las hojas y tallos a la panícula se ha detenido, y comienza la pérdida de humedad del grano que ha alcanzado 25 % a 30 % de humedad (Dunand y Saichuk, 2009).

Una vez que el contenido de humedad del grano alcanza un 20 % y el tallo principal presenta entre un 15 % y 18 %, la planta está en estado de ser cosechada (Dunand y Saichuk, 2009).

Por otro lado, Dunand y Saichuk (2009) proponen dividir el estado reproductivo de la planta de arroz en cinco etapas: prebota, bota, emisión de la panoja, llenado del grano y madurez.

Pre-bota. El período de pre-bota se refiere al intervalo que va desde el inicio de la elongación del entrenudo y antes de la formación completa de la hoja bandera. Durante este estado continúan el desarrollo de las hojas, la elongación del entrenudo, formación del tallo y se inicia la formación de la panícula.

Bota. Se caracteriza por la hinchazón de la vaina de la hoja bandera, debido al crecimiento de la panícula y al desarrollo de la meiosis.

Bota es el período en el cual los componentes de la panícula que están dentro de la vaina de la hoja bandera, se encuentran completamente formados. El comienzo de este estado se puede identificar 6 d antes de la emergencia de la panícula (Yoshida, 1981).

De acuerdo al estado de desarrollo de la panícula, la bota se puede dividir en tres fases: temprana, intermedia y tardía, lo que se basa en la cantidad de la vaina de la hoja bandera que está expuesta sobre el collar de la hoja del cual emergió (Dunand y Saichuk, 2009).

Bota temprana. El collar de la hoja bandera aparece primero sobre el collar de la penúltima hoja en el tallo principal y dura hasta que el collar de la hoja bandera está aproximadamente 5 cm sobre el collar de la penúltima hoja (Foto 18a).

Bota intermedia. El collar de la hoja bandera está entre 5 y 12,7 cm sobre el collar de la penúltima hoja (Foto 18b).

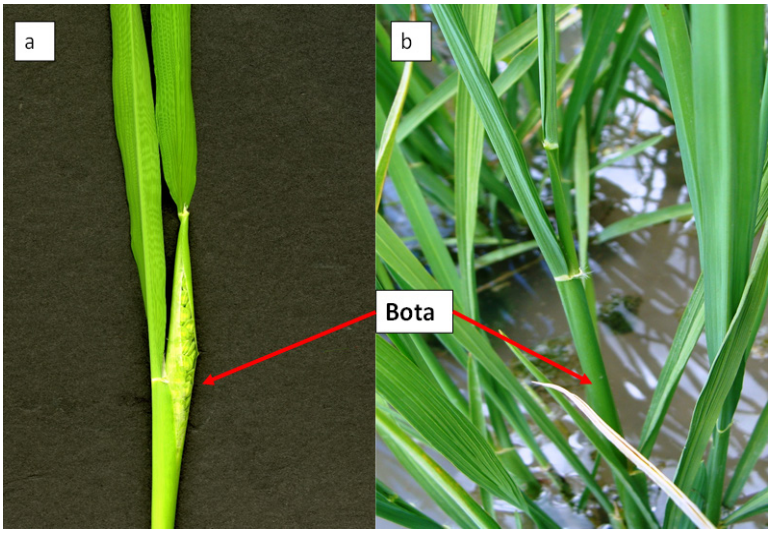


Foto18. Bota intermedia (a) y temprana (b).

Bota tardía. El collar de la hoja bandera está a 12,7 cm o más sobre el collar de la penúltima hoja. En este estado el crecimiento de la panícula toma una forma de huso y causa que la bota aumente de volumen, produciendo una parte más ancha en el centro de la bota con un diámetro menor a ambos extremos.

Emisión de la panoja. Se refiere a la excersión de la panoja desde la vaina de la hoja bandera del tallo principal, debido a la elongación del último entrenudo del tallo. A medida que el entrenudo se alarga, empuja a la panícula a emerger de la vaina (Foto 19). Cuando se termina la elongación del último entrenudo, la panícula expone su máximo tamaño con una porción del último entrenudo, sobre el collar de la hoja bandera. La emisión de la panoja del tallo principal es anterior al de las macollas. El período de la emergencia de la panícula es variable dentro y entre las plantas, y puede tomar desde 4 a 5 d como hasta 10 a 14 d (Dunand y Saichuk, 2009).

Agronómicamente, se considera 50 % de la emergencia de la panícula, cuando el 50 % de las panículas de los tallos de una muestra tienen un rango desde recién emergidas a completamente emergidas (Dunand y Saichuk, 2009).

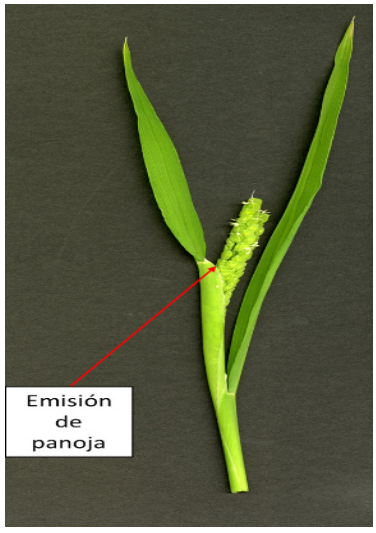


Foto 19. Emisión de panoja.

Llenado del grano. El llenado del grano se extiende desde floración hasta madurez fisiológica del grano. La formación del grano resulta principalmente de la acumulación de carbohidratos, y la primera fuente de carbohidratos es la fotosíntesis que ocurre entre las 3 y 4 hojas superiores de la planta (Dunand y Saichuk, 2009).

Madurez. El período de desarrollo del grano, desde la antesis al estado de grano maduro, es de unos 30 d, tiempo en el cual el aumento del largo del grano ocurre en los primeros 6 d después de la polinización, mientras que el aumento en el ancho del grano ocurre entre los 3 a 8 d después de la polinización (Wu et al., 2016b). Se considera madurez fisiológica, cuando se detiene el proceso de translocación de los carbohidratos desde las hojas y tallos a la panícula, y comienza la pérdida de humedad del grano, alcanzando éste entre un 25 % a 30 % de humedad. Una vez que el contenido de humedad del cultivo está entre 18 % a 21 %, la planta está en estado de cosecha (Foto 20).

Foto 20. Arroz con madurez fisiológica.

Rendimiento en grano

El rendimiento es una característica compleja, controlada por factores genéticos (QTLs) y ambientales (Vergara et al., 1964; Craufurd y Wheeler, 2009; Wang et al., 2012; Qian et al., 2016; Zeng et al., 2017; Zhang et al., 2017b). En arroz, el rendimiento es determinado indirectamente por caracteres tales como altura de la planta, período de crecimiento, habilidad de macollar, largo de la panícula, largo del grano, número de granos por panícula y, directamente, por los componentes de rendimiento como número de panículas por superficie o por planta, número de granos llenos por panícula y peso de 1.000 granos (Sakamoto y Matsuoka, 2008; Huang et al., 2013b) (Foto 21).

En arroz, la cantidad de tallos (macollas) está controlada por factores genéticos (Fukushima, 2018) y ambientales, como las prácticas agronómicas de nutrición (Fageria, 2014a; 2014b; Chen et al., 2014; Wang et al., 2016), manejo del agua (Ohe et al., 2010; Zhang et al., 2015b), densidad de plantas (Huang et al., 2013b; Tian et al., 2017) y sistema de siembra (Yan et al., 2009; Martínez-Eixarch et al., 2013).

El número de tallos (macollas) por superficie y número de panículas por superficie son determinados en la etapa vegetativa de la planta, en el establecimiento del cultivo. En cambio, el número de espiguillas por panícula, peso de 1.000 granos y porcentaje de granos llenos son determinados

Foto 21. Semilla certificada cosechada.

en la etapa reproductiva de la planta (Fageria, 2007; Sadras, 2007; Fageria et al., 2011; Wang et al., 2017a; 2017b).

La cantidad de macollas afecta también la producción de biomasa, captura de asimilados y rendimiento final de la planta (Awan et al., 2007). La regulación de la formación de las macollas, en tiempo y número, tiene una implicancia en el rendimiento final. Mientras más temprano emerge la macolla, se produce una mayor captura de asimilados por la planta a través de la fotosíntesis y son más productivas. Por el contrario, macollas muy tardías pueden no alcanzar su completo desarrollo y pueden ser improductivas (Mohapatra y Kariali, 2008; Wang et al., 2017a; 2017b). Por otro lado, un exceso de macollas puede producir panojas más pequeñas, con un menor número y peso de granos y menor rendimiento. En ese sentido, una escasa cantidad de macollas implica un menor número de panojas por superficie y, eventualmente, un menor rendimiento (Awan et al., 2007; Wang et al., 2016).

Otras características de interés que pueden contribuir al rendimiento en grano son el período de crecimiento y altura de la planta (Sakamoto y Matsuoka, 2008), los que pueden influir el número de panículas por superficie, número de granos y peso de 1.000 granos (Peng et al., 2004). Variedades con un largo período de crecimiento pueden acumular más fotosintatos, absorber más nutrientes y agua, lo que puede aumentar área foliar, número de panículas, granos y peso de ellos. Por otro lado, la introducción de las variedades semi enanas mejoró el índice de cosecha, resistencia a tendedura y rendimiento (Spielmeyer et al., 2002; Kovi et al., 2011b); sin embargo, plantas muy pequeñas pueden tener menor rendimiento (Yuan, 2017; Zhang et al., 2017b).

Las características morfológicas de las hojas, como su largo, ancho, grosor, dureza, posición y senescencia, son importantes en la determinación de la capacidad fotosintética de la planta y en el rendimiento de una variedad. Hojas erectas permiten una mayor cantidad, penetración y distribución de la luz en la canopia de la planta y, por lo tanto, una mayor actividad fotosintética de la planta (Yoshida, 1981; Yuan et al., 2015; Xu et al., 2018). Hojas gruesas, generalmente tienen una mayor densidad de cloroplastos por unidad de área y mayor capacidad fotosintética que hojas delgadas. El tamaño de la hoja está directamente asociado al ángulo de las hojas, por lo cual, hojas más cortas tienden a ser más erectas que hojas largas (Fageria, 2014a; 2014b). Hojas duras y gruesas son más lignificadas y presentan mayor resistencia a las inclemencias climáticas (Fageria, 2007).

Otro factor importante a considerar en el crecimiento de la planta es el índice de área foliar (IAF), que representa el área de la superficie de la hoja por unidad de área de superficie de suelo. El IAF

es un parámetro fisiológico que puede estar asociado al rendimiento del cultivo. El IAF en el arroz aumenta durante el crecimiento y desarrollo de la planta, alcanzando su máximo en la emisión de la panoja o floración (Yoshida, 1981). Esta situación se debe al aumento del número de hojas en el tallo principal y macollas, como también en el tamaño de las hojas. El IAF está afectado por factores genéticos (variedad) y ambientales (Jahn et al., 2011; Mon Ko et al., 2017; Xu et al., 2018).

El aumento del peso seco de los tallos sigue una curva sigmoidea durante el crecimiento de la planta, debido al aumento del peso de tallos y hojas. El peso de la planta se compone, principalmente, de carbohidratos (celulosa, almidón) y proteína, donde el componente inorgánico es menor, con excepción del silicio que está en mayor cantidad presente en el tallo. El metabolismo de las proteínas predomina durante la fase vegetativa y el de los carbohidratos en la fase reproductiva, lo que puede afectar también el rendimiento de la planta (Fageria, 2007).

En este sentido, el rendimiento de la planta puede verse afectado también por la cantidad de carbohidratos acumulados antes o después de la emisión de la panoja. Los carbohidratos acumulados antes de la emisión de la panoja contribuyen con un 20 % a 40 % al rendimiento; sin embargo, aquellos acumulados con posterioridad a la emisión de la panoja, son responsables por el 70 % de la variación del rendimiento. En este sentido, el mayor órgano fotosintético de la planta después de la emisión de la panoja es la hoja bandera, seguido de las tres hojas inferiores a ella (Fageria, 2007).

La altura de la planta es otra característica que puede influir sobre el rendimiento (Fageria, 2007). Plantas de altura baja (90 a 100 cm) son menos susceptibles al vuelco o tendedura a altas dosis de nitrógeno y permiten mayor densidad de plantas; sin embargo, pueden presentar menor habilidad competitiva con las malezas (Yoshida, 1981). La altura de la planta es una característica controlada en forma genética (Liu et al., 2010; Ma et al., 2016; Zhou et al., 2016) y modificada por factores agronómicos y ambientales (Ohe et al., 2007; Weng et al., 2014; Ma et al., 2016; Li et al., 2019).

El número de granos llenos por panícula es otro componente de rendimiento que también afecta el rendimiento. En variedades semi enanas existe una relación lineal entre el rendimiento y el número de granos por metro cuadrado (Yoshida, 1981). El número de granos por panícula está determinado por la arquitectura de la panícula (Furutani et al., 2006) que incluye el largo de la panícula y el número de ramas primarias y secundarias de ella (Sakamoto y Matsuoka, 2008; Kovi et al., 2011a). El número de granos puede ser afectado por la densidad de plantas, la fertilización nitrogenada, el grado de macollamiento y las condiciones climáticas de radiación y temperatura (Yoshida, 1981).

El peso de 1.000 granos está determinado por su tamaño y velocidad de llenado del grano. El tamaño del grano depende del largo, ancho y espesor (Huang et al., 2013a). El peso del grano es gobernado, principalmente, por factores genéticos, a diferencia del llenado del grano que es afectado mayormente por factores ambientales. El peso del grano está relacionado con el rendimiento biológico y el índice de cosecha, siendo el rendimiento biológico el peso total de la parte aérea de la planta y un indicador de su capacidad fotosintética (Yoshida, 1981). El índice de cosecha (IC) es la relación entre el rendimiento en grano (llamado también rendimiento económico) y el rendimiento biológico, y se expresa en porcentaje.

En la estrategia de modificar algunos componentes del rendimiento para aumentarlo, es importante considerar que el aumento de un componente no necesariamente puede traer aparejado un incremento del rendimiento, ya que ellos tienden a compensarse. Es decir, el aumento de uno puede significar la reducción de otro (Yang y Zhang, 2010; Qian et al., 2016; Zeng et al., 2017). Por ejemplo, el aumento del peso del grano podría reducir el número de granos por panícula y el rendimiento del grano, lo que debe ser considerado en el mejoramiento genético (Yang y Zhang, 2010).

Por otro lado, para un aumento del rendimiento, cuando el material de siembra está compuesto por híbridos (no variedades provenientes de líneas puras), es importante considerar la heterosis que se puede obtener al cruzar poblaciones de diferentes orígenes y también la variabilidad y distancia genética que existe en las diferentes variedades (Virmani et al., 1982; Zhou et al., 2012; Cao y Zhan, 2014; Huang et al., 2015; 2016; Tao et al., 2016). En este sentido, de todas las posibles combinaciones de germoplasma de arroz para la producción de híbridos, el cruzamiento entre genotipos del tipo *japonica* por *indica* resultaría en mayor heterosis, mayor altura, mayor producción de biomasa e índices de cosecha superiores a 0,5 y mejor resistencia a la tendedura (Yuan, 2017). Aunque en algunos casos existe un cierto grado de incompatibilidad en la progenie debido a los diferentes orígenes genéticos de los tipos *japonica* e *indica* (Chen et al., 2008; Qian et al., 2016; Zhu et al., 2017), aunque existen formas de mejorarla esta incompatibilidad con el uso de genes específicos (*WC*, *wide compatibility*) y progenitores masculinos no necesariamente *japonica,* sino mezclas entre *japonica* e *indica* (Yuan, 2017).

Finalmente, es importante considerar en esta estrategia la actualización y mejoramiento de las prácticas agronómicas como fertilización, manejo de agua, sistemas de siembra, densidad de plantas, entre otros, para que la variedad exprese su máximo potencial de rendimiento (Tao et al., 2006; Sadras, 2007; Yang y Zhang, 2010; Fageria et al., 2011; Wang et al., 2017a; 2017b; Das et al., 2018).

Tipo de crecimiento y propagación

Aunque el arroz cultivado es una planta anual que se propaga por semilla, se puede mantener vegetativamente como una planta perenne. El carácter perenne del arroz fue heredado de su ancestro silvestre *O. rufipogon* (Morishima et al., 1963). Bajo condiciones naturales, después de la cosecha, los brotes de las macollas del rastrojo, ubicados en la parte basal de los nudos, empiezan a crecer nuevamente y a formar nuevos tallos llamados en inglés ´ratoons`. Este crecimiento de la planta puede entregar una nueva cosecha (IRRI, 1988). Esta segunda cosecha produce plantas con menor cantidad de hojas, altura y número de panículas por superficie y por planta, y menor cantidad de granos por panícula. Al mismo tiempo, debido a la reducción de la duración del día a fines de verano y otoño, se reduce la radiación resultando en un rendimiento final de un 40 % menos de granos, con respecto a la primera cosecha (Dunand y Saichuk, 2009).

Consideraciones finales

A nivel productivo, el cultivo de arroz debiera lograr altos rendimientos de granos, manteniendo un estándar de rendimiento industrial (mayor porcentaje de granos enteros) para maximizar el factor de comercialización. Desafortunadamente, ambos componentes no suelen correlacionarse frecuentemente en una misma variedad o híbrido; por este motivo, es crucial seleccionar en primera instancia la variedad que combine las mejores características morfológicas y eco-fisiológicas según el destino de comercialización, con el potencial de rendimiento esperado. De este modo, para disminuir la brecha de rendimiento del cultivo a campo se requiere de la elección del mejor genotipo y de prácticas de manejo adecuadas y oportunas. El estudio de la predicción de la interacción del genotipo con el ambiente, se inicia con la genética y con la identificación de aquellas variables morfológicas, fenológicas y eco-fisiológicas determinantes del rendimiento y calidad de granos, con respuesta genética más simple, estable y con menor variación ambiental dentro del genotipo, que siguen explicando, aún en la actualidad, el mayor potencial de rendimiento del cultivo.

Referencias

Arshad, M., Farooq, M., Asch, F., et al. 2017. Thermal stress impacts reproductive development and grain yield in rice. Plant Physiol. Biochem. 115:57-72.

Awan, T., Mushtaq, A., Inayat, A., et al. 2007. Contribution of tillers within a rice plant to yield and yield components. J. Agric. Res. 45:237-243.

Cao, L., Zhan, X. 2014. Chinese experiences in breeding three-line, two-lines and super hybrid rice. p. 279-308. In Yan, W. (ed.) Rice: Germplasm, genetics and improvement. IntechOpen. doi:10.5772/51100.

Chang, T., Bardenas, E., del Rosario, A. 1965. The morphology and varietal characteristics of the rice plant. Tech. Bull. 4. 40 p. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna The Philippines.

Chaudhary, T., Ghildyal, B. 1969. Germination responses of rice seed to constant and altering temperatures. Agron. J. 61:328-330.

Chen, J., Ding, J., Ouyang, Y., et al. 2008. A triallelic system of S5 is a major regulator of the reproductive barrier and compatibility of *indica-japonica* hybrids in rice. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105:11436-11441.

Chen, S., Zheng, X., Wang, D., et al. 2014. Effect of enhanced panicle fertilization on nitrogen use efficiency traits of rice (*Oryza sativa*) with different planting patterns. J. Plant Nutr. 37:1316-1326.

Counce, P.A., Gealy, D.R., Sun, S-J. 2003. Rice physiology. p. 129-151. In Smith, C.W., Dilday, R.H. (eds.) Rice: Origin, history, technology, and production. John Willey & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.

Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.J. 2000. A uniform, adaptive and objective system for expressing rice development. Crop Sci. 40:436-443.

Craufurd, P., Wheeler, T. 2009 Climate change and the flowering time of annual crops. J. Exp. Bot. 60:2529-2539.

Das, K., Panda, B., Shaw, B., et al. 2018. Grain density and its impact on grain filling characteristic of rice: mechanistic testing of the concept in genetically related cultivars. Sci. Rep. 8:4149.

Das, K., Sarkar, R., Ismail, A. 2005. Elongation ability and non-structural carbohydrate levels in relation to submergence tolerant rice. Plant Sci. 168:131-138.

Dhankhar, P. 2014. Rice milling. IOSR J. Eng. 4:34-42.

Dilday, R., Mgonja, M., Amonsilpa, S., et al. 1990. Plant height vs. mesocotyl and coleoptile elongation in rice: Linkage or pleiotropism? Crop Sci. 30:815-818.

Donoso,G., Paredes, M., Becerra, V. 2013. Study of pollen development in Rice under controlled conditions. VIII Reunión anual de la Sociedad de Biología Vegetal, 2-5 de Diciembre, Pucón, Chile.

Drew, M., He, C-J., Morgan, O. 2000. Programmed cell death and aerenchyma formation roots. Trends Plant Sci. Rev. 5:123-127.

Dubey, A., Verma, S., Goswami, S., et al. 2018. Effect of temperature on different growth stages and physiological process of rice crop-a review. Bull. Env. Pharmacol. Life Sci. 7:129-136.

Dunand, R., Saichuk, J. 2009. Rice growth and development. In J. Saichuk (ed.). Louisiana rice production handbook. Pub. 2321. LSU Agricultural Center at the Rice Research Station, Baton Rouge, Louisiana, USA.

Evans, D. 2003. Aerenchyma formation. New Phytol. 161:35-49.

Fabre, D., Adriani, D., Dingkuhn, M., et al. 2016. The qTSN4 effect on flag leaf size, photosynthesis and panicle size, benefits to plant grain production in rice, depending on light availability. Front. Plant Sci. 7:623.

Fageria, N. 2007. Yield physiology of rice. J. Plant Nutr. 30:843-879.

Fageria, N. 2014a. Mineral nutrition of rice. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Fageria, N. 2014b. Nitrogen harvest index and its association with crop yields. J. Plant Nutr. 37:795-810.

Fageria, N., Moreira, A., Coelho, A. 2011. Yield and yield components of upland rice as influenced by nitrogen sources. J. Plant Nutr. 34:361-370.

Foyer, C. 1987. The basis for source-sink interaction in leaves. Plant Physiol. Biochem. 25:649-657.

Fukushima, A. 2018. Varietal differences in tiller and panicle development determining the total number of spikelets per unit in rice. Plant Prod. Sci. 22:192-201.

Furutani, I., Sukegawa, S., Kyozuka, J. 2006. Genome-wide analysis of spatial and temporal gene expression in rice panicle development. Plant J. 46:503-511.

Gasser, C.S., Broadhvest, J., Hausser, B.A. 1998. Genetic analysis of the ovule development. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 49:1-24.

Gu, D., Zhen, F., Hannaway, D., et al. 2017. Quantitative classification of rice (*Oryza sativa* L.) root length and diameter using image analysis. PLoS ONE 12(1):e0169968.

Hirano, K., Ordonio, R.L., Matsuoka, M. 2017. Engineering the lodging resistance mechanism of post-Green Revolution rice to meet future demands. Proc. Jpn. Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci. 93(4):220-233.

Hong, S.K., Kitano, H., Satoh, H., et al. 1996. How is embryo size genetically regulated in rice? Development 122:2051-2058.

Hoshikawa, K. 1989. The growing rice plant: An anatomical monograph. Nobunkyo, Tokyo, Japan.

Hu, B., Wan, Y., Li, X., et al. 2013. Phenotypic characterization and genetic analysis of rice with pubescent leaves and glabrous hulls (*PLgh*). Crop Sci. 53:1878-1886.

Huang, R., Jiang, L., Zheng, J., et al. 2013a. Genetic bases of rice grain shape: so many genes, so little known. Trends Plant Sci. 18:218-226.

Huang, X., Yang, S., Gong, J., et al. 2015. Genomic analysis of hybrid rice varieties reveals numerous superior alleles that contribute to heterosis. Nat. Commun. 6:6258.

Huang, X., Yang, S., Gong, J., et al. 2016. Genomic architecture of heterosis for yield traits in rice. Nature 537:629-633.

Huang, M., Yang, C., Ji, Q., et al. 2013b. Tillering response of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China. Field Crops Res. 149:187-192.

Ikeda, K., Sunohara, H., Nagato, Y. 2004. Developmental course of inflorescence and spikelet in rice. Breed. Sci. 54:147-156.

IRRI. 1988. Rice rationing. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Ismail, A., Ella, M., Vergara, E., et al. 2009. Mechanisms associated with tolerance to flooding during germination and early seedling growth in rice (*Oryza sativa*). Ann. Bot. 103:197-209.

Ismail, A., Johnson, M., Ella, M., et al. 2012. Adaptation to flooding during emergence and seedling growth in rice and weeds, and implications for crop establishment. AoB Plants 2012:pls019.

Itoh, J-I., Nonomura, K-I., Ikeda, K., et al. 2005. Rice plant development: from zygote to spikelet. Plant Cell Physiol. 46:23-47.

Jahn, C., Mackay, J., Mauleon, R., et al. 2011. Genetic variation in biomass traits among 20 diverse rice varieties. Plant Physiol. 155:157-168.

Juliano, B.O., Bechtel, D.B. 1985. The rice grain and its gross composition. p. 17-58. In Juliano, B.O. (ed.) Rice: Chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA.

Kawano, N., Ito, O., Sakagami, J-I. 2009. Morphological and physiological response of rice seedlings to complete submergence (flash flooding). Ann. Bot. 103:161-166.

Kobayashi, H., Ikeda, T.M., Nagata, K. 2013. Spatial and temporal progress of programmed cell death in the developing starchy endosperm of rice. Planta 237:1393-1400.

Kovi, M., Bai, X., Mao, D., et al. 2011a. Impact of seasonal changes on spikelets per panicle, panicle length and plant height in rice (*Oryza sativa* L.) Euphytica 179:319-331.

Kovi, M., Zhang, Y., Yu, S., et al. 2011b. Candidacy of a chitin-inducible gibberellin-responsive gene for a major locus affecting plant height in rice that is closely linked to green revolution gene *sd1*. Theor. Appl. Genet. 123:705-714.

Krishnan, S., Dayanandan, P. 2003. Structural and histochemical studies on grain-filling in the cariopsis of rice (*Oryza sativa* L.). J. Biosci. 28:455-469.

Li, S., Jiang, H., Wang, Y., et al. 2019. Responses of plant growth, physiological, gas exchange parameters of super and non-super rice to rhizosphere temperature at the tillering stage. Sci. Rep. 9:10618.

Li, Z., Pinson, S., Stansel, J., et al. 1998. Genetic dissection of the source-sink relationship affecting fecundity and yield in rice (*Oryza sativa* L.). Mol. Breed. 4:419-426.

Liu, G., Mei, H., Liu, H., et al. 2010. Sensitivities of rice grain yield and other panicle characters to late-stage drought stress revealed by phenotypic correlation and QTL analysis. Mol. Breed. 25:603-613.

Luo, J., Tang, S-Q, Hu, P-S., et al. 2007. Analysis on factors affecting seedling establishment in rice. Rice Sci. 14:27-32.

Ma, X., Feng, F., Wei, H., et al. 2016. Genome-wide association study for plant height and grain yield in rice under contrasting moisture regimes. Front. Plant Sci. 7:1801.

Makino, A. 2011. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat. Plant Physiol. 155:125-129.

Martínez-Eixarch, M., Zhu, D., Català-Forner, M., et al. 2013. Water, nitrogen and plant density affect the response of leaf appearance of direct seeded rice to thermal time. Rice Sci. 20(1):52-60.

Matsui, T., Kagata, H. 2003. Characteristics of floral organs related to reliable self-pollination in rice (*Oryza sativa* L.). Ann. Bot. 91:473-477.

Meng, F., Xiang, D., Zhu, J., et al. 2019. Molecular mechanism of root development in rice. Rice 12:1.

Miro, B., Ismail, A. 2013. Tolerance of anaerobic conditions caused by flooding during germination and early growth in rice (*Oryza sativa* L.). Front. Plant Sci. 4:269.

Miro, B., Longkumer, T., Entila, F., et al. 2017. Rice seed germination underwater: morpho-physiological responses and the bases of differential expression of alcoholic fermentation enzymes. Front. Plant Sci. 8:1857.

Mohapatra, P., Kariali, E. 2008. Time of emergence determines the pattern of dominance of rice tillers. Aust. J. Crop Sci. 1:53-62.

Mohapatra, P., Patel, R., Sahu, S. 1993. Time flowering affects grain quality and spikelets partitioning within the rice panicle. Aust. J. Plant Physiol. 20:231-242.

Mohapatra, P., Sahu, S. 1991. Heterogeneity of primary branch development and spikelets survival in rice in relation to assimilates of primary branches. J. Exp. Bot. 42:871-879.

Moldenhauer, K., Counce, P., Hardke, J. 2018. Rice growth and development. p. 9-20. In Hardke, J. (ed.) Rice production handbook. Pub. MP192-10-2018RV. University of Arkansas, Division of Agriculture Res. & Extension, Arkansas, USA.

Moldenhauer, K.A., Gibbons, J.H. 2003. Rice morphology and development. p.103-127. In Smith, C.W., Dilday, R.H. (eds.) Rice: Origin, history, technology, and production. John Willey & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.

Mon Ko., K., Hirai, Y., Zamora, O., et al. 2017. Agronomic and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) under different water management systems, fertilizer types and seedling age. Am. J. Plant Sci. 8:3338-3349.

Morishima, H., Hinata, K., Oka, H. 1963. Comparison of modes of evaluation of cultivated rice species, *Oryza sativa* L. and *Oryza glaberrima* Steud. Jpn. J. Breed. 12:153-165.

Murata, Y., Matsushima, S. 1975. Rice. p. 75-99. In Evan, L.T. (ed.) Crop physiology. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Naik, K., Mohapatra, P. 1999. Ethylene inhibitors promote male gametophyte survival in rice. Plant Growth Regul. 28:29-39.

Nakatomo, T., Inagawa, S., Nagato, Y. 1987. An analysis of the growth pattern of glumes in rice plant. Jpn. J. Crop Sci. 56:149-155.

Ohe, M., Okita, N., Daimon, H. 2010. Effects of deep-flooding irrigation on growth, canopy structure and panicle weight yield under different planting patterns in rice. Plant Prod. Sci. 13:193-198.

Ohe, I., Saitoh, K., Kuroda, T. 2007. Effects of high temperature on growth, yield and dry-matter production of rice grown in the paddy field. Plant Prod. Sci. 10:412-422.

Oka, H. 1988. Origin of cultivated rice. Jpn. Sci. Soc. Press, Tokyo, Japan.

Peng, S., Huang, J., Sheehy, J., et al. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 101:9971-9975.

Ponnamperuma, F. 1972. The chemistry of submerged soils. Adv. Agron. 24:29-96.

Qian, Q., Guo, L., Smith, S., et al. 2016 Breeding high-yield superior quality hybrid super rice by rational design. Natl. Sci. Rev. 3:283-294.

Sabelli, P., Larkins, B. 2009. The endosperm development of endosperm in grasses. Plant Physiol. 149:14-26.

Sadras, V. 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. Field Crops Res.100:125-138.

Sakamoto, T., Matsuoka, M. 2008. Identifying and exploiting grain yield genes in rice. Curr. Opin. Plant Biol. 11:209-214.

Sarkar, R., Sharma, S., Reddy, J., et al. 2006. Physiological basis of submergence in rice and implication for crop improvement. Curr. Sci. 91:899-906.

Skinner, D.J., Hill, T.A., Gasser, C.S. 2004. Regulation of ovule development. Plant Cell 16 Suppl.: S32-S45.

Spielmeyer, W., Ellis, M., Chandler, P. 2002. Semidwarf (*sd-1*), "green revolution" rice, contains a defective gibberellin 20-oxidase gene. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 99:9043-9048.

Steffens, B., Geske, T., Sauter, M. 2011. Aerenchyma formation in the rice stem and its promotion by H_2O_2. New Phytol. 190:369-378.

Taguchi-Shiobara, F., Ota, T., Ebana, K., et al., 2015. Natural variation in the flag leaf morphology of rice due to a mutation of the *NARROW LEAF 1* gene in *Oryza sativa* L. Genetics 201:795-808.

Tao, H., Brueck, H., Dittert, K., et al. 2006 Growth and yield formation of rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS). Field Crops Res. 95:1-12.

Tao, Y., Zhu, J., Xu, J., et al. 2016. Exploitation of heterosis loci for yield and yield components in rice using chromosome segment substitution lines. Sci. Rep. 6:36802.

Tian, G., Gao, L., Kong, Y., et al. 2017. Improving rice population productivity by reducing nitrogen rate and increasing plant density. PLoS ONE 12(8):e0182310.

Tilebeni, H., Yousefpour, H., Farhade, R., et al. 2012. Germination behavior of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars seeds to difference temperature. Adv. Environ. Biol. 6:573-577.

Turner, F., Chen, C., Bollich C. 1982. Coleoptile and mesocotyl lengths in semi-dwarf rice seedlings. Crop Sci. 22:43-46.

Turner, F., Chen, C., McCauley, G. 1981. Morphological development of rice seedlings in water at controlled oxygen levels. Agron. J. 73:566-570.

Vergara, B., Lilis, R., Tanaka, A. 1964. Relationship between length of growing period and yield of rice plants under a limited nitrogen supply. Soil Sci. Plant Nutr. 10:15-21.

Virmani, S., Aquino, R., Khush, G. 1982. Heterosis breeding in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 63:373-380.

Vriezen, W., Zhou, Z., Straeten, D. 2003. Regulation of submergence-induced enhanced shoot elongation in *Oryza sativa* L. Ann. Bot. 91:263-270.

Wang, F., Cheng, F., Zhang, G. 2006. The relationship between grain filling and hormone content as affected by genotype and source-sink relation. Plant Growth Regul. 49:1-8.

Wang, D., Huang, J., Nie, L., et al. 2017a. Integrated crop management practices for maximizing grain yield of double-season rice crop. Sci. Rep. 7:38982.

Wang, Y., Lu, J., Ren, T., et al. 2017b. Effect of nitrogen and tiller type on grain yield and physiological responses in rice. AoB Plants 9:plx012.

Wang, Y., Ren, T., Lu, J., et al. 2016. Heterogeneity in rice tillers yield associated with tillers formation and nitrogen fertilizer. Agron. J. 108:1717-1725.

Wang, S., Wu, K., Yuan, Q. 2012. Control of grain size, shape and quality by *OsSPL16* in rice. Nat. Genet. 44:950-954.

Wang, Z., Zhang, F., Xiao, F., et al. 2018. Contribution of mineral nutrients from source to sink organs in rice under different nitrogen fertilization. Plant Growth Regul. 86:158-167.

Weng, X., Wang, L., Wang, J., et al. 2014. Grain number, plant height, and *Heading date7* is a central regulator of growth, development, and stress response. Plant Physiol. 164:735-747.

Win, A., Tanaka, T., Matsui, T. 2020. Panicle inclination influences pollination stability of rice (*Oryza sativa* L.). Plant Prod. Sci. 23:60-68.

Wu, X., Liu, J., Li, D., et al. 2016a. Rice cariopsis development I: Dinamic changes in the endosperm. J. Integr. Plant Biol. 58:772-785.

Wu, X., Liu, J., Li, D., et al. 2016b. Rice cariopsis development II: Dinamic changes in the endosperm. J. Integr. Plant Biol. 58:786-798.

Wu, L., Liu, Z., Wang, J., et al. 2011. Morphological, and physiological characteristics involved in development of the large culm trait in rice. Aust. J. Crop Sci. 5:1356-1363.

Wu, J., Qi, Y., Hu, G., et al. 2017. Genetic architecture of flag leaf length and width in rice (*Oryza sativa* L.) revealed by association mapping. Genes Genom. 39:341-352.

Xu, P., Ali, A., Han, B., et al. 2018. Current advances in molecular basis and mechanisms regulating leaf morphology in rice. Front. Plant Sci. 9:1528.

Xu, X., Vergara, B. 1986. Morphological changes in rice panicle development: a review of literature. International Rice Research Institute. Res. Paper Series 117:1-16.

Yan, J., Yu, J., Tao, G., et al. 2009. Yield formation and tillering dynamics of direct-seeded rice in flooded and nonflooded soils in the Huai River Basin of China. Field Crops Res. 116:252-259.

Yang, H.Y. 2005. Rice Reproductive Biology. Hangzhou: Zhejiang University Press. p. 19–25.

Yang, X., Hwa, C-M. 2008. Genetic and physiological characterization of the *OsCem* mutant in rice: formation of connected embryos with multiple plumules or multiple radicles. Heredity 101:239-246.

Yang, J., Peng, S., Visperas, R., et al. 2000. Grain filling pattern and cytokinin content in the grain and roots of rice plants. Plant Growth Regul. 30:261-270.

Yang, J., Zhang, J. 2010. Grain-filling problem in 'super' rice. J. Exp. Bot. 61:1-5.

Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., et al. 2006. Post-anthesis development of inferior and superior spikelets in rice in relation to abscisic acid and ethylene. J. Exp. Bot. 57:149-160.

Yin, L., Xue, H. 2012. The MADS29 transcription factor regulates the degradation of the nucellus and the nucellar projection during rice seed development. Plant Cell 24:1049-1065.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, Philippines.

Yoshida, H., Nagato. 2011. Flower development in rice. J. Exp. Bot. 62:4719-4730.

Yuan, L. 2017. Progress in super-hybrid rice breeding. Crop J. 5:100-102.

Yuan, S., Li, Y., Peng, S. 2015. Leaf lateral asymmetry in morphological and physiological traits of rice plant. PLoS ONE 10:e129832. doi:10.1371/journal.pone.129832.

Zeng, D., Tian, Z., Rao, Y., et al. 2017. Rational design of high-yield and superior-quality rice. Nat. Plants 3:17031.

Zhang, J., Li, G., Huang, Q., et al. 2017. Effect of culm carbohydrate partitioning on basal stem strength in a high-yielding rice population. Crop J. 5: 478-487.

Zhang, J., Li, G., Song, Y., et al. 2014. Lodging resistance characteristics of high-yielding rice populations. Field Crops Res. 161:64-74.

Zhang, B., Ye, W., Ren, D., et al. 2015a. Genetic analysis of flag leaf size and candidate genes determination of a major QTL for flag leaf width in rice. Rice 8:2.

Zhang, Y., Wang, Z., Li, Q., et al. 2015b. Short-term complete submergence of rice at the tillering stage increases yield. PLoS ONE 10:e0127982.

Zhang, W., Wu, L., Wu, X., et al. 2016. Lodging resistance of *japonica* rice (*Oryza sativa* L.): morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates. Rice 9:31.

Zhang, Y., Yu, C., Lin, J., et al. 2017. *OsMPH1* regulates plant height and improves grain yield in rice. PLoS One 12:e0180825.

Zhao, Y., Jiang, C-H., Rehman, R., et al. 2019. Genetic analysis of root and shoots in rice seedling by association mapping. Genes Genomics 41:95-105.

Zhou, G., Chen, Y., Yao, W., et al. 2012. Genetic composition of yield heterosis in an elite rice hybrid. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 109:15847-15852.

Zhou, L., Liu, S., Wu, W., et al. 2016. Dissection of genetic architecture of rice plant height and heading date by multiple-strategy-based association studies. Sci. Rep. 6:29718

Zhou, W., Lv, T., Yang, Z., et al. 2017. Morphophysiological mechanism of rice yield increase in response to optimal nitrogen management. Sci. Rep. 7:17226.

Zhu, Y., Yu, Y., Cheng, K., et al. 2017. Processes underlying a reproductive barrier in *indica-japonica* rice hybrids revealed by transcriptome analysis. Plant Physiol. 174:1683-1696.

Capítulo 15. Crecimiento y desarrollo de la planta de arroz en Chile

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

El crecimiento y el desarrollo de la planta de arroz están influenciados por factores genéticos (genotipo y variedad), ambientales y por la interacción del genotipo con el ambiente. Es así como la temperatura, el fotoperíodo, la radiación solar, precipitaciones, época de siembra, densidad de plantas, fertilización, manejo del agua, control de malezas, entre otros, influyen directamente sobre el crecimiento de la planta, controlando su velocidad y duración de crecimiento en los diferentes estados de desarrollo y, finalmente, en el rendimiento y calidad del producto cosechado.

El arroz posee una amplia adaptación a las condiciones de clima y suelo. El arroz crece desde el noreste de China (53° lat. N, pasando por el Ecuador hasta el sur de Chile (36° lat. S). Sin embargo, la mayor proporción del arroz crece en los trópicos, siendo la temperatura uno de los principales factores que determina su crecimiento. El arroz crece también en diferentes alturas, lo hace a nivel del mar en algunas localidades de la India y a 2.000 m s.n.m. en Nepal. Además, puede cultivarse en condiciones de secano, de riego y en presencia de 150 a 500 cm de agua (Yoshida, 1977).

Las dos subespecies de arroz asiático, *Oryza sativa indica* y *Oryza sativa japonica*, están distribuidas principalmente en las regiones del trópico y de clima templado, debido a su respuesta diferencial a la temperatura y fotoperíodo. El crecimiento de las variedades de arroz tipo *japonica* en las latitudes extremas del norte y en el sur, se debe de manera significativa, a su insensibilidad al fotoperíodo y al aumento de la tolerancia a las bajas temperaturas. Por ello, cuando las variedades tipo *japonica* se siembran en el trópico, se comportan como variedades muy precoces, floreciendo muy rápidamente y con muy poca producción de materia seca, lo que incide en un muy bajo rendimiento (Yoshida, 1977). Sin embargo, los tipos *indica* y *japonica* pueden cultivarse en latitudes intermedias. Es así como, en el sur-oeste de China, el arroz del tipo *indica* se cultiva en bajas latitudes, el tipo *japonica* en altas latitudes, y ambos tipos en regiones intermedias en latitud. En el arroz tipo *japonica* se pueden distinguir dos grupos de arroces: *japonica* tropical y *japonica* templado (Garris et al., 2005).

En Chile, el arroz cultivado pertenece al tipo *japonica* templado de grano largo ancho, a diferencia del arroz tipo *japonica* templado convencional que posee un grano corto y más o menos redondeado. Este cultivo se desarrolla en el extremo sur de la zona productora de arroz del mundo, entre la ciudad y provincia de Linares, Región del Maule, ubicada en la latitud 35°50'48" sur y longitud 71°35'35,1" oeste, y la comuna de San Nicolás, provincia de Punilla, Región de Ñuble, ubicada en la latitud 36°28'47,21" sur y longitud 72°13'41,63" oeste, y a una altura de 71 m s.n.m., y 151 m s.n.m., respectivamente. Ambas localidades presentan un clima mediterráneo (clasificación climática de Köppen: Csb). Por ello, la planta de arroz se debe adaptar a las condiciones específicas de fotoperíodo, bajas temperaturas, escasas precipitaciones y alta radiación que caracterizan a la región productora de arroz más austral del mundo.

En este capítulo se entregan los primeros resultados empíricos del crecimiento y desarrollo de la variedad ´Zafiro-INIA` obtenidos en la zona de San Carlos, los cuales se irán ajustando en el tiempo, a medida que haya una mayor disponibilidad de datos. Los resultados fueron obtenidos a través de un muestreo secuencial de plantas desde un ensayo de evaluación de cinco épocas de siembra, utilizando el sistema de siembra directa. La siembra de cada época fue realizada entre el 22 septiembre y el 18 de noviembre del 2015, con diferencias aproximadas a los 15 d entre ellas. El ensayo fue establecido en la localidad de San Carlos, provincia de Punilla, Región de Ñuble, ubicada a 36° 23' 8,09" latitud sur y a 72°1'6,96" longitud oeste y a una altitud de 141 m s.n.m.

Las evaluaciones relacionadas con el crecimiento de la planta que se tuvieron en cuenta fueron la altura de planta (cm), peso seco de tallos, macollas, hojas, panícula y granos (g m^{-2}). También se consideraron los estados de desarrollo como el inicio de macolla, del primordio, excersión de la panoja y desarrollo de los granos. Al momento de la cosecha, se evaluó la altura (cm), esterilidad (%), rendimiento (t ha^{-1}) y porcentaje de grano entero.

La evaluación de la época de siembra permite seleccionar las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de una variedad, lo que se ve reflejado, finalmente, en la producción y calidad del producto cosechado (San-oh et al., 2004; Khalifa, 2009). Es así como la época de siembra puede modificar el patrón de crecimiento de la planta, principalmente a través de dos aspectos: el estado de desarrollo, que se refiere al cambio cualitativo, y la producción de materia seca, que es un cambio cuantitativo que ocurre durante el crecimiento de la planta.

I. Estados de desarrollo de la planta de arroz

La escala de desarrollo de la planta de arroz propuesta, se puede resumir en tres etapas, donde ocurren una serie de eventos (estados) sucesivos: emergencia, desarrollo vegetativo y desarrollo reproductivo (Counce et al., 2000).

Temperatura (°C) promedio, acumulación de grados (°C) y radiación. Con el objetivo de tener una visión más completa sobre las condiciones de crecimiento y desarrollo de la planta, se presentan a continuación los datos de temperatura, radiación y fotoperíodo ocurridos en la temporada de evaluación. Las precipitaciones durante el crecimiento del cultivo fueron mínimas y no tuvieron mayor incidencia en el suministro y uso del agua por parte de la planta, debido a que ésta permaneció inundada durante su crecimiento y desarrollo.

Para realizar la comparación entre las épocas de siembra, se alinearon las diferentes fases de desarrollo de la planta en un sólo punto, sin considerar la fecha calendario en que ocurrió cada evento fenológico.

Temperatura (°C) promedio. En primer lugar, se presentan las temperaturas medias que ocurrieron durante el desarrollo de la planta (Figura 1).

En general, se puede observar que las temperaturas medias aumentaron desde la emergencia de la plántula hasta el inicio de panícula (entre 19 y 23 °C), observándose una leve disminución en los estadios finales de desarrollo (entre 19 y 20 °C). Sin embargo, en cada época de siembra, las plantas estuvieron sometidas a diferentes temperaturas en el transcurso de su crecimiento y desarrollo. Por ejemplo, en emergencia entre 11 y 16 °C, macolla entre 18 y 21 °C, diferenciación de la panícula y floración 20 a 21 °C y formación del grano 19 a 20 °C (Figura 1). Es importante destacar que la última época de siembra, a pesar de haber tenido el mayor promedio de temperatura durante el período vegetativo, tuvo la menor temperatura promedio durante el período reproductivo, es decir, durante el desarrollo de la panícula, floración, llenado de grano y madurez de la planta (Figura 1), lo cual puede explicar, en parte, el menor rendimiento observado.

Acumulación de los grados día (°C). Corresponde a la suma de temperaturas mayores a 10 °C, considerada como la temperatura mínima para el crecimiento de la planta. La acumulación de los grados día se presenta en dos formas: como la suma de grados día desde la siembra a un estado de desarrollo específico, por ejemplo, siembra a macolla, siembra a floración, etc. para las diferentes épocas de siembra (Figura 2); y la segunda, como la acumulación de los grados día por estado de desarrollo, por ejemplo, macolla para las diferentes épocas de siembra (Figura 3).

Desde siembra a un estado desarrollo específico. La acumulación de grados día hasta el estado de plántula del arroz es muy similar en todas las épocas de siembra. Sin embargo, a partir de esta fase de desarrollo, las plantas empiezan a acumular grados día en forma diferente, dependiendo

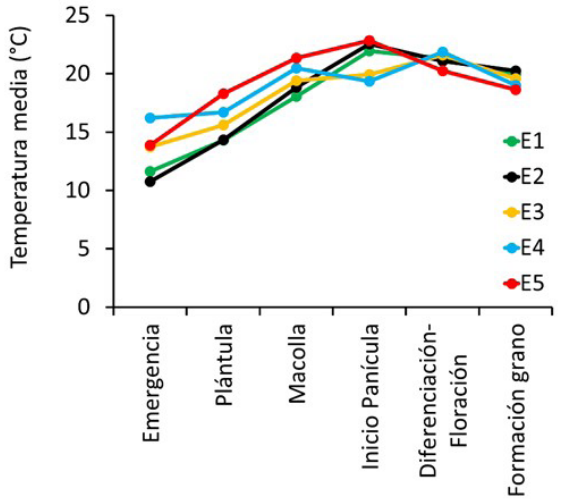


Figura 1. Temperatura (°C) promedio durante el crecimiento y desarrollo de la planta de arroz, variedad ´Zafiro-INIA`, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

de la época de siembra. Es así como las plantas de la primera época de siembra acumulan una menor cantidad de grados día comparada con las plantas sembradas en otras épocas, considerando el mismo estado de desarrollo. Por el contrario, las plantas sembradas en la última época acumulan la mayor cantidad de grados día. Es interesante hacer notar también que, durante el período comprendido entre la macolla y el inicio de panícula, se observa un estancamiento en la acumulación de grados , pero con tasas de acumulación diferente para cada una de las épocas de siembra. Así, las plantas sembradas en la primera época de siembra acumularon 471 grados día, mientras que las plantas de la última época acumularon 699 grados día. Posterior al inicio de la panícula, se reanuda la acumulación prácticamente lineal de grados día, llegando todas las plantas a la etapa final de la formación del grano, con una acumulación similar cercana a los 1.260 grados día (Figura 2).

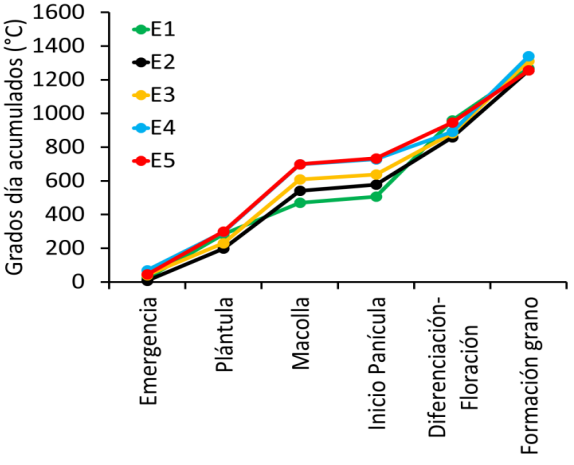


Figura 2. Acumulación de grados día desde siembra a un estado específico de desarrollo de la planta de arroz, variedad ´Zafiro-INIA`, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

Por estado de desarrollo. Al comparar la acumulación de grados día por estado de desarrollo, se pueden observar diferencias asociadas a las épocas de siembra (Figura 3). Es así como en el estado de emergencia de las plantas, en todas las épocas de siembra se acumuló la menor cantidad de grados día, en comparación a los otros estados de desarrollo de las plantas de las otras épocas de siembra (Figura 3), aunque dentro de este estado de desarrollo se observaron también diferencias entre las épocas de siembra. Esta situación indica que, durante este período de desarrollo, se presentaron más con temperaturas menores a 10 °C, en comparación a los otros estados de desarrollo. En el caso del estado de plántula, la mayor acumulación de grados día ocurrió en la primera época de siembra, seguido de las últimas épocas. A macolla, la menor acumulación de grados día la recibieron las plantas sembradas en la primera época de siembra, la que aumentó a medida que se atrasaba la época de siembra. En el inicio de la panícula-diferenciación-floración, la mayor acumulación la obtuvo la primera época, la que fue disminuyendo en las épocas de siembras posteriores. Finalmente, en el llenado del grano, las mayores acumulaciones de grados día ocurrieron en la segunda, tercera y cuarta época de siembra, presentado una situación similar la primera y la cuarta época de siembra (Figura 3).

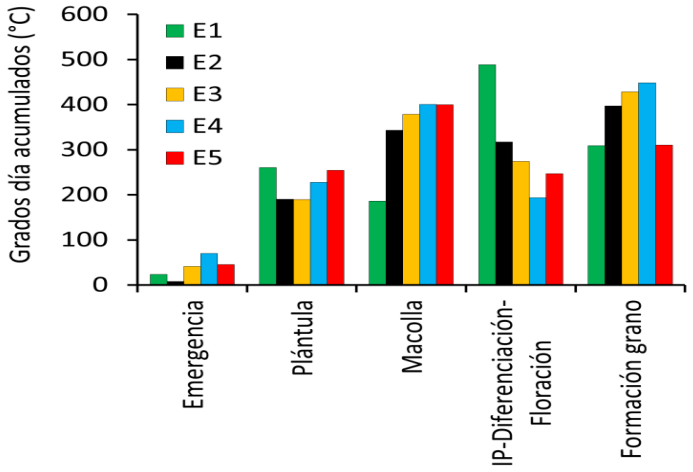


Figura 3. Acumulación de grados día en un estado específico de desarrollo de la planta, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

Acumulación de la radiación solar. Al igual que la acumulación de los grados día, la acumulación de la radiación solar se presenta en dos formas: la primera desde la siembra a la fase de un desarrollo específico (Figura 4), y la segunda en relación al estado desarrollo en sí mismo (Figura 5).

Desde la siembra a la fase de desarrollo específica. A la emergencia no se presentaron diferencias en la acumulación de radiación solar entre las épocas de siembra, a diferencia del estado de plántula donde la primera época tuvo una mayor acumulación de radiación. A macolla, la acumulación de la radiación fue similar en todas las épocas y estuvo levemente superior a los 2.000 MJ m^{-2}, similar a lo ocurrido en el estado de inicio de la panícula (Figura 4). Al estado de la diferenciación de la panícula-floración, la acumulación de la radiación de las plantas sembradas en las diferentes épocas de siembra fue decreciente, situación similar a la ocurrida en la formación del grano; es decir, las plantas de las primeras épocas de siembra acumularon más radiación solar que las plantas sembradas en las últimas épocas (Figura 4).

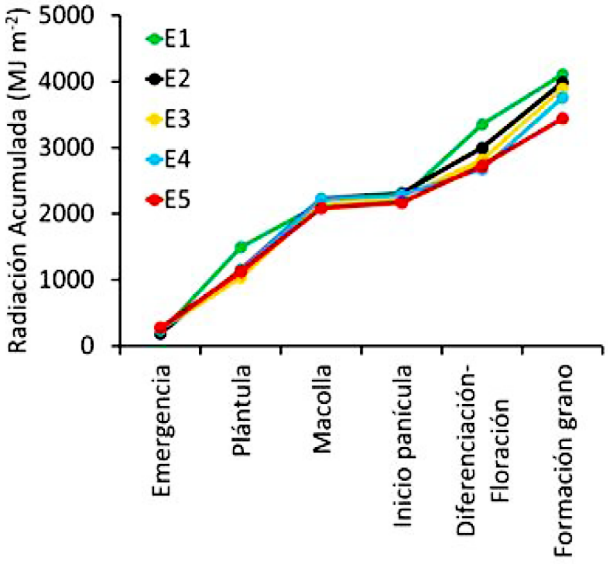


Figura 4. Acumulación de radiación solar (MJ m^{-2}) desde siembra a un estado específico de desarrollo de una planta de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

En cada estado de desarrollo. La acumulación de la radiación solar por cada estado desarrollo específico de la planta, presentó diferencias asociadas a la época de siembra (Figura 5). En el estado de emergencia se presentó una situación similar a la descrita anteriormente en la Figura 3. En el estado de plántula, la mayor acumulación se produjo en la primera época de siembra, entre 1.000 y 1.300 MJ m^{-2}, la que decreció a valores entre 800 y 1.000 MJ m^{-2}. En la macolla, la menor acumulación de radiación solar se produjo en la primera época (700 MJ m^{-2}), obteniéndose una acumulación de radiación solar similar en la segunda, tercera y cuarta época, con alrededor de 1.000 MJ m^{-2} (Figura 5). En el inicio de la panícula-diferenciación, la acumulación de la radiación solar fue mayor en la primera época de siembra, la que fue decreciendo a medida que se atrasaba la época de siembra desde 1.200 a 640 MJ m^{-2}. En la formación del grano la mayor acumulación se produjo en la segunda, tercera y cuarta época de siembra, alrededor de 1000 MJ m^{-2}.

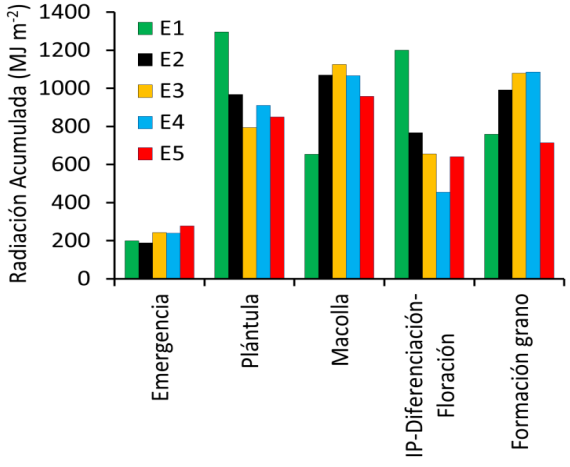


Figura 5. Acumulación de radiación solar (MJ m^{-2}) en un estado específico de desarrollo de una planta de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

Fotoperíodo. Las horas de luz solar a las que las plantas estuvieron expuestas durante su crecimiento y desarrollo se presentan en la Figura 6. En general, las horas de luz solar aumentan desde la emergencia de la plántula hasta la macolla, momento en que empieza a disminuir hasta la formación del grano y madurez. Durante el período vegetativo, las plantas de las primeras épocas de siembra estuvieron expuestas a un menor número de horas de luz que las plantas sembradas en las últimas épocas de siembra, observándose las mayores diferencias en el estado de emergencia y de plántula. En el estado de macolla, las horas luz fueron muy similares en las diferentes épocas de siembra. En la etapa reproductiva, la situación fue inversa; es decir, las plantas de las primeras épocas de siembra estuvieron expuestas a un mayor número de horas de luz en comparación a las plantas sembradas en las últimas épocas.

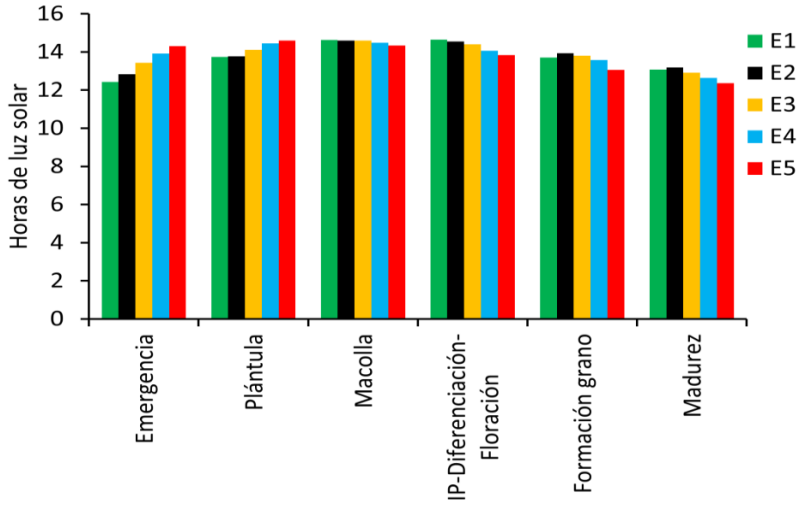


Figura 6. Horas de luz solar por estado de desarrollo de una planta de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

Antecedentes de efectos de las épocas de siembra realizadas en el país

Estudios realizados en Chile, señalan que la época óptima para la siembra del arroz está determinada, principalmente, por la temperatura. La planta de arroz necesita 10 °C para germinar, 20 a 22 °C para florecer, y 12 a 18 °C para madurar (Yoshida, 1977). Por lo tanto, los meses de septiembre, octubre y noviembre son meses que pueden presentar una temperatura adecuada para la siembra (Koller, 1958).

Durante los primeros intentos para producir arroz en el país, las siembras se empezaron a realizar después del 18 de septiembre. Sin embargo, con el correr de los años éstas se fueron atrasando hasta octubre, debido a las condiciones climáticas adversas y entrega tardía del agua a los agricultores (Sims, 1969; Sims y Alvarado, 1972). En este aspecto, debe considerarse que las primeras siembras se realizaron en la zona central del país, donde existen mayores temperaturas, por lo que con el correr de los años, se fueron desplazando hacia el sur, donde se presentan menores temperaturas.

Además de la temperatura, otros estudios han determinado que la época de siembra depende también de la variedad a sembrar. Es así como la recomendación para la siembra óptima de las variedades ´Diamante-INIA`, ´Quella-INIA` y ´Oro` era octubre, mientras que para la variedad ´Ñiquén-INIA` se podía extender hasta noviembre, dada su mayor precocidad (Alvarado y Pino, 1980). Otro estudio señala que la mejor época para ´Diamante-INIA` y ´Buli-INIA` era octubre y la

primera quincena de noviembre, y que para la variedad 'Oro' era la primera quincena de noviembre (Alvarado y Hernaíz, 1995). Finalmente, otro estudio indica que la época de siembra óptima para ´Diamante-INIA` y ´Brillante-INIA` era entre finales de septiembre y todo octubre (Alvarado y Hernaíz, 2007). Últimamente, se recomienda sembrar las variedades ´Zafiro-INIA`, ´Cuarzo-INIA` (Cordero et al., 2010a; 2010b; Donoso y Paredes, 2015), ´Platino-INIA` (Paredes et al., 2016) y ´Digua Cl` (Paredes et al., 2019), durante los primeros 20 de octubre (Donoso et al., 2018); mientras que en la siembra directa se recomienda sembrar entre el 20 de septiembre hasta el 15 de octubre (Henríquez et al., 2018).

Uno de los objetivos de los estudios de época de siembra es determinar un período que permita a la planta reducir los efectos negativos del clima, principalmente las altas y bajas temperaturas, y las lluvias tempranas de otoño y, de esta manera, aprovechar el efecto benéfico de estos factores climáticos en los procesos críticos del crecimiento y desarrollo de la planta (Donoso y Paredes, 2015). Para lograr este objetivo, es necesario una planificación y preparación adecuada de la siembra. Por ejemplo, en el caso de una siembra de arroz pre-germinado, se requiere realizar todas las labores de preparación de suelo y el llenado de los cuadros temprano (Alvarado y Hernaíz, 2007). Para siembra directa, en tanto, es fundamental, además de realizar las labores anteriores, mantener un sistema de drenaje adecuado del terreno que permita el ingreso de la maquinaria para efectuar la siembra (Henríquez et al., 2018).

Estados de desarrollo fenológico de la planta

Emergencia (S). En la siembra, la primera etapa de este proceso se inicia cuando la semilla comienza a absorber agua y se expone a una temperatura adecuada (S0). Durante este período se activan todos los procesos fisiológicos que llevarán, finalmente, a la germinación de la semilla. Este proceso continúa con la emergencia del coleóptilo (S1) y de la radícula (S2), y termina con la emergencia del prófilo desde el coleóptilo (S3). El prófilo es la primera hoja que emerge, aunque se caracteriza por no poseer lámina ni collar (Counce et al., 2000).

En la evaluación de plantas sembradas en diferentes épocas de siembra, el proceso de germinación hasta la emergencia de la plántula demoró alrededor de 15 d para la primera época de siembra y aproximadamente 10 d para las otras épocas de siembra (Figura 7).

Esta diferencia, en la velocidad de germinación y emergencia de las plántulas, estuvo relacionada, principalmente, con la temperatura observada durante las diferentes épocas de siembra, ya que la humedad no fue un factor limitante. Las semillas de arroz tienen un amplio rango de temperaturas entre las cuales pueden germinar (Yoshida, 1977), y su velocidad de germinación depende de la temperatura a la que las semillas están expuestas. Es así como a temperaturas entre 27 y 37 °C, la germinación de un 90 % a 97% de las semillas puede demorar alrededor de 2 d, a diferencia de semillas expuestas a temperaturas entre 5 y 10 °C, donde la germinación puede tomar 30 o más d (Yoshida, 1972). Semillas sembradas en la primera quincena de septiembre en la localidad de San Carlos, germinaron alrededor de 20 a 25 d después de la siembra (Gabriel Donoso, com. personal). Por otro lado, las bajas temperaturas que se observan en siembras muy tempranas, pueden producir el ´almidonamiento` de la semilla o pudrición del grano (Koller, 1958) y/o clorosis en el estado posterior, el desarrollo de las plántulas (Sánchez et al., 2014). Otros factores asociados con las bajas temperaturas, como nublados y vientos fuertes, pueden también reducir la germinación y emergencia de las plántulas, situación que puede ocurrir durante la segunda quincena de septiembre en algunas zonas arroceras del país (Sims y Alvarado, 1972).

Desarrollo vegetativo (V). Esta etapa está representada por diferentes estados que toman el nombre de las hojas presentes y que poseen collar en su tallo principal: primera hoja (V1), segunda hoja (V2), tercera hoja (V3) hasta Vn, donde (n) es la última hoja, es decir, la hoja bandera

(Counce et al., 2000), y que comprende el estado de plántula y de macolla hasta el inicio de la formación de la panícula.

Las primeras fases del estado vegetativo, plántula y macolla, presentaron un comportamiento diferente, dependiendo de la época de siembra del arroz. El estado vegetativo total se acortó a medida que se atrasó la época de siembra. Es así como en la primera y segunda época de siembra duró alrededor de 90-95 d, en la tercera y cuarta época alrededor de 80-85 d, y en la quinta época 75 d. El estado de plántula fue de 60 d en la primera época, la que se fue reduciendo a medida que se atrasaba la época de siembra, hasta llegar a 30 d en la última época de siembra. El período de macolla duró alrededor de 25-30 d en la primera época de siembra, el que fue aumentando a medida que se atrasaba la época de siembra, llegando a un máximo de 40 d en la tercera época, para luego comenzar a reducirse, llegando a los 35 d en la última época de siembra. El tiempo desde la siembra hasta macolla tomó alrededor de 75 d en la primera época; 55 d en la segunda; 45 d en la tercera y cuarta época, y alrededor de 40 d en la quinta época de siembra (Figura 7).

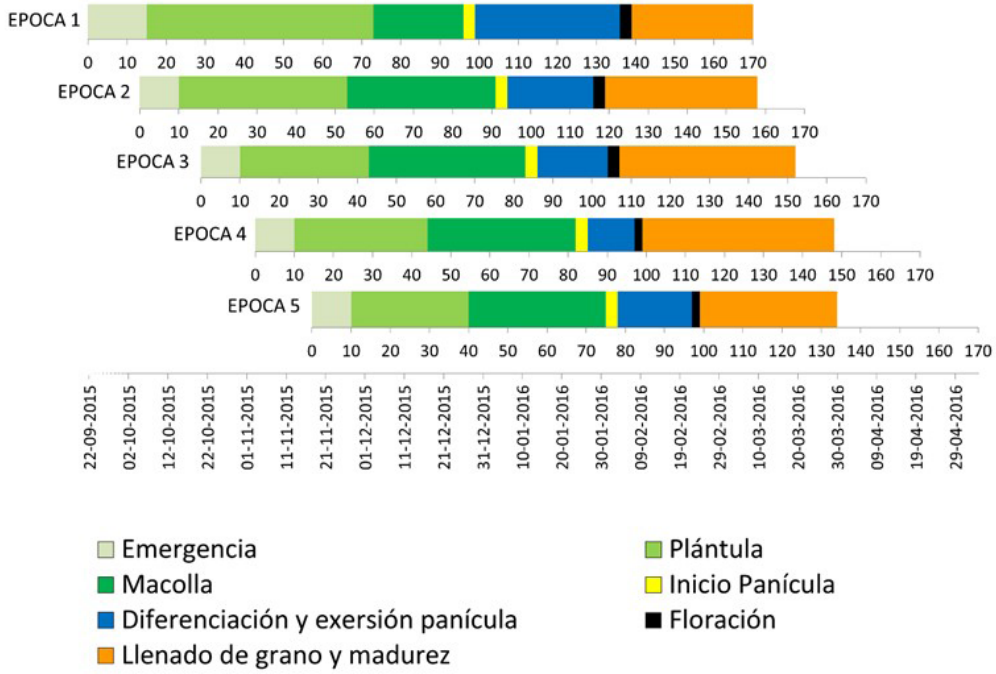


Figura 7. Duración (d) de los estados de desarrollo de la planta de arroz, variedad ´Zafiro-INIA`, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

En general, las siembras realizadas temprano favorecen un buen establecimiento de las plántulas y un mayor número de macollas (Khalifa, 2009). La duración de este período está controlada, principalmente, por la temperatura del aire y la disponibilidad de agua, debido a que, hasta la elongación del tallo, los puntos de crecimiento de las hojas, macollas y panículas están bajo la superficie del agua, pero las estructuras que están sobre el agua, se ven afectadas también por la temperatura del aire (Sharifi et al., 2018).

La presencia de temperaturas menores a 20 °C durante este período puede producir un retraso en el crecimiento de la planta y reducir su vigor (Yoshida, 1981; Ali et al., 2006), un bajo número de plántulas y macollas (Shimono et al., 2002), una muerte de plantas (Fujino et al., 2004; Baruah et al., 2009), una aceleración del crecimiento de las plantas y una reducción del período de siembra a floración, lo que significa un menor tiempo para la acumulación de reservas, lo que afecta el llenado de granos (Alvarado y Hernaíz, 2007; Sharifi et al., 2018) con las consiguientes pérdidas en el rendimiento (Roel et al., 2005). Las bajas temperaturas durante el estado vegetativo pueden

afectar también el grado de tolerancia al frío de las plantas, durante la etapa reproductiva (Matsumura et al., 2012). Es así como, altas temperaturas antes de la iniciación de la panícula, pueden contribuir a una mayor tolerancia al frío en la etapa reproductiva (Shimono et al., 2007; 2011). Las mayores diferencias determinadas en el ciclo del cultivo, pueden explicarse por las diferencias que ocurren en el período vegetativo.

Las plantas de arroz tienen diferentes requerimientos de radiación solar, dependiendo de su estado de desarrollo (Stansel et al., 1965; Yoshida y Parao, 1976). Una baja radiación durante el periodo vegetativo tiene un escaso efecto en el rendimiento y componentes de rendimiento (Yoshida y Parao 1976). Por otro lado, la disponibilidad del agua también puede afectar el desarrollo de la planta. Un déficit hídrico en el estado vegetativo puede reducir la altura de la planta, número de macollas y área foliar; sin embargo, este estrés se puede revertir si se proveen las condiciones hídricas necesarias para continuar el crecimiento y desarrollo de la planta. Dadas estas condiciones, es muy importante mantener un buen desarrollo de las plantas durante este periodo.

Desarrollo reproductivo (R). En el período reproductivo se pueden distinguir 10 fases de desarrollo basado en criterios morfológicos: inicio de la formación de la panícula (R0); diferenciación de la panícula (R1); formación del collar de la hoja bandera (R2); excersión de la panícula (R3); antesis o floración (R4); expansión del largo y ancho del grano (R5); expansión del espesor del grano (R6); reducción de la humedad del grano (R7); maduración del grano (R8); y madurez de los granos en la panícula completa (R9). Las fases R0 a R3 corresponden al desarrollo de la panícula, las fases R4 a R8 al desarrollo individual de los granos en la panícula y R9 al desarrollo completo de la panícula (Counce et al., 2000).

El período reproductivo está afectado también por diferentes factores climáticos, como temperatura, radiación, fotoperíodo y disponibilidad de agua. Por lo tanto, diferentes épocas de siembra expondrán a las plantas a diferentes condiciones climáticas que afectarán diferentes características asociadas al desarrollo reproductivo de la planta, entre las que se encuentran inicio de la panícula, contenido de clorofila, índice de área foliar, desarrollo de la panícula y rendimiento en grano (Khalifa, 2009).

Temperatura. A medida que el punto de crecimiento de la panícula se ubica sobre la superficie del agua, alrededor de la meiosis, la temperatura del aire puede jugar un rol importante en el crecimiento y desarrollo de la panícula, llenado del grano, y madurez (Yoshida, 1981; Ellis y Hong, 1994; Roel et al., 2005; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015). Las siembras tardías atrasan la fecha de floración (febrero), donde las temperaturas y la radiación comienzan a disminuir (Donoso et al., 2018), lo cual aumenta el riesgo de esterilidad floral, disminución del rendimiento (Sims, 1969; Alvarado y Pino, 1980; Alvarado y Hernaíz, 1995; 2007; Donoso y Paredes, 2015) y calidad del grano (Alvarado y Hernaíz, 2007). El agricultor que siembra tarde, puede perder más de 0,1 t ha^{-1} por día de atraso en su siembra (Alvarado y Hernaíz, 2007).

En este período, las temperaturas medias inferiores a 20 °C pueden causar varios daños, tales como excersión incompleta de la panícula, degeneración del ápice de la panícula, atraso en la floración, esterilidad apical y madurez irregular de la planta. En este sentido, el periodo más sensible a las bajas temperaturas en la planta de arroz, es la microspora temprana que ocurre después de la meiosis (Farrel et al., 2006; Imin et al., 2006; Shimono et al., 2007), es decir, entre 7 y 14 d antes de la emergencia de la panícula, dependiendo de las variedades y de las condiciones climáticas (Julia y Dingkuhn, 2012; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015). El segundo estado sensible a las bajas temperaturas es la antesis (Yoshida et al., 1981; Matsui et al., 2001; Jagadish et al., 2007; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015). En este aspecto, la esterilidad floral puede estar relacionada a problemas que se presentan en los mecanismos de respuesta de la antera, del polen y el estigma (Nakamura et al., 2000; Zeng et al., 2017) y que pueden afectar el tamaño y dehiscencia de la antera y una pobre germinación del polen en el estigma (Matsui et al., 2001; Prasad et al., 2006). Durante estos dos estados críticos, las bajas temperaturas, diurnas o nocturnas, la magnitud y la duración de estos eventos, pueden causar una alta esterilidad floral. Por otro lado, la presencia de altas tempera-

turas, mayores a 35 °C al estado de floración, pueden causar también diferentes grados de esterilidad (Satake y Yoshida 1978; Matsui et al., 2001; Jagadish et al., 2010). En este sentido, se considera que un 15 % de esterilidad podría ser considerado como un valor normal para el cultivo del arroz. Un mayor porcentaje de granos vanos puede ser un indicio de condiciones climáticas adversas durante la meiosis, floración, madurez del grano y/o producto de una mala nutrición de la planta (Gunawardena et al., 2003).

La temperatura del aire afecta también el periodo comprendido entre la antesis y la madurez, regulando la emisión de la panoja, velocidad y duración del llenado del grano. En general, altas temperatura aceleran la velocidad del llenado de grano, y reducen este período. Por otro lado, las bajas temperaturas pueden alargar el período de madurez, causar una madurez irregular de la planta y un menor peso de los granos. Las plantas expuestas a temperaturas extremas (bajas o altas), en el período posterior a la antesis, pueden ver afectado su rendimiento y la viabilidad del grano cosechado. Este último aspecto es muy importante en la producción de semillas, ya que la semilla cosechada tendrá un bajo porcentaje de germinación, lo que redundará en un pobre establecimiento del cultivo en la siguiente temporada, si es usada como semilla (Ellis y Hong, 1994; Ellis, 2011; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015).

Además de la temperatura, la radiación afecta también el estado reproductivo. Es así como una alta radiación favorece la producción de un mayor número de panículas, el llenado de grano y el rendimiento (Yoshida y Parao, 1976; Zhang et al., 2009; Restrepo y Garces, 2013; Zhu et al., 2016). En forma contraria, una baja radiación y una alta temperatura durante el estado reproductivo puede afectar negativamente la producción de asimilados, lo que incidirá en el tamaño de las panículas, llenado de grano y la capacidad productiva de la planta (Fageria, 2007; Sánchez-Reinoso et al., 2014).

La disponibilidad de agua es otro factor que puede afectar al estado reproductivo, donde el período más crítico es la floración, debido a que un estrés hídrico en esta etapa puede producir esterilidad y reducción del rendimiento.

Área foliar y fotosíntesis. El área foliar aumenta a medida que avanza el crecimiento de la planta, alcanzando su máximo valor alrededor de la emisión de la panoja y constituyéndose en la principal fuente de fotosíntesis. La acumulación de materia seca de hojas y tallos es importante para el desarrollo de la planta, ya que una parte de los carbohidratos almacenados en estas estructuras van a ser translocados al grano y a las raíces, durante el período de llenado del grano (Fu et al., 2011; Zhang et al., 2017a). En tanto, la cantidad de materia seca producida en este estado de desarrollo va a incidir en forma importante en el índice de cosecha de la planta.

La fotosíntesis en la planta de arroz contribuye entre un 60 % y 90 % del peso final del grano (Yoshida, 1972; 1981), y la capacidad fotosintética de la planta aparece como un factor limitante en variedades de alto rendimiento (Makino, 2011). Existen varios esfuerzos tendientes a manipular la capacidad fotosintética (Long et al., 2006; Makino, 2011; Karki et al., 2013) y fotorespiratoria de la planta de arroz (Shen et al., 2019), con el objetivo de mejorar el rendimiento, incrementar la eficiencia del uso del agua y del nitrógeno, especialmente en ambientes cálidos y secos (Karki et al., 2013; Shen et al., 2019). En este sentido, se indica que el mejoramiento de la tasa fotosintética ha contribuido a aumentar el potencial de rendimiento de las nuevas variedades (Zhang y Kokubun, 2004; Hubbart et al., 2007).

Los carbohidratos no estructurales que se almacenan temporalmente en los tallos y la lámina de la hoja alcanzan su máxima concentración alrededor de la emisión de la panícula, los que empiezan a movilizarse durante el llenado del grano (Yoshida, 1981). El aporte de los carbohidratos no estructurales al grano puede fluctuar entre 24 % y 27 % (Cock y Yoshida, 1972). Sin embargo, la cantidad de carbohidratos translocados desde hojas y tallos, va a depender del contenido de nitrógeno (Pan et al., 2011; Wu et al., 2018), la radiación (Okawa et al., 2003), la temperatura (Shi et al., 2013; Xiong et al., 2015) y el agua disponible para la planta (Yang et al, 2001; Hayashi et al., 2013; He et al., 2014). En este sentido, hay que considerar que una parte importante de los carbo-

hidratos almacenados en el grano proviene de la fotosíntesis de las tres hojas apicales (Yoshida, 1981; Abou-Khalifa et al., 2008; Rahman et al., 2013). En este proceso, es importante considerar también que las hojas de la planta de arroz permanecen verdes durante una parte importante del período de madurez, a diferencia de la panoja que adquiere un color amarillento a inicios de este período, lo que indica que las hojas son fotosintéticamente activas (Wang et al., 2015). Por otro lado, la acumulación de nitrógeno en las hojas superiores después de la antesis es importante para mantener el estado verde de las hojas (Murchie et al., 2002; Yamamoto et al., 2017); por lo tanto, una pobre acumulación de nitrógeno en éstas o una alta translocación de nitrógeno desde las hojas después de la antesis, puede acelerar la senescencia temprana de las hojas, debilitando su capacidad fotosintética, lo que puede resultar en una menor cantidad de asimilados para el llenado del grano (Buchanan-Wollaston, 1997). Además de la translocación de carbohidratos, durante esta etapa, se observa también una movilización de minerales hacia los granos desde diferentes órganos de la planta (Wang et al., 2018).

Bajo las condiciones evaluadas, el período total de duración de la etapa reproductiva se redujo a medida que se atrasaba la época de siembra, siendo de 70 a 75 d en la época 1; de 65 a 70 d en la época 2 y 3; de 65 en la época 4; y de alrededor de 55 d en la quinta época (Figura 8).

El inicio de la panícula es un proceso complejo de determinar y su duración se fijó en 3 a 4 d. La diferenciación de la panícula ocurre al interior de la hoja y el estado se llama comúnmente ´bota`, debido a la forma abultada que toma el centro de este segmento de planta. La excersión de la panícula se refiere a la aparición de la panícula fuera de la vaina de la hoja bandera que la envuelve. El tiempo que tomó la diferenciación y la excersión de la panícula se redujo a medida que se atrasó la época de siembra, teniendo una duración de 40 d en la primera época de siembra y de 20 d en la última época de siembra. El período de floración se estima que ocurrió entre 2 y 3 d, dependiendo de la época de siembra. Finalmente, el período que incluyó el desarrollo y la madurez del grano fue más corto en la primera época de siembra, aumentó en las épocas de siembra 2, 3 y 4, y se redujo nuevamente en la época 5 (Figura 8).

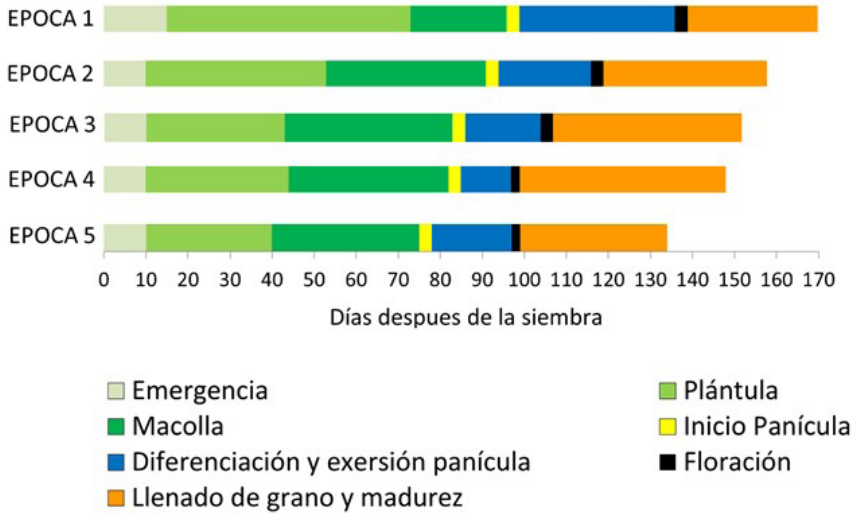


Figura 8. Comparación de los estados de desarrollo de la planta de arroz, variedad ´Zafiro-INIA`, sembrada en diferentes épocas. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

En resumen, una variedad que se siembra en la época recomendada, tiene el potencial de poder lograr un mayor rendimiento, en comparación con una variedad sembrada muy temprano o más tarde, ya que las condiciones climáticas pueden ser adversas en el período de siembra, durante el crecimiento y desarrollo de planta, como también en la cosecha. Bajas temperaturas en la siembra, pueden alargar el período de emergencia de la planta. Así mismo, puede afectar la etapa reproductiva de la planta, desarrollo del óvulo, polen y los procesos de polinización y fecundación, lo que puede producir aborto floral y/o un mal desarrollo del grano. Altas temperaturas, en este mismo estado, pueden afectar negativamente el estado reproductivo, el desarrollo del grano y la calidad del grano, pudiendo generarse un mayor porcentaje de panza blanca.

II. Descripción del crecimiento y desarrollo de la planta

Para describir el crecimiento y desarrollo de la planta se analizan dos características: el incremento de la planta en altura (cm) y la acumulación de la materia seca (g m^{-2}).

A. Crecimiento

El incremento de la altura de la planta (cm) siguió el desarrollo de una curva sigmoidea, típica del crecimiento de las plantas. La evaluación de la altura de las plantas se separó en sus dos componentes: tallo principal y tallos secundarios, representados por la macolla 1, macolla 2 y macolla 3.

Altura del tallo principal. La evolución del tallo principal de la variedad ´Zafiro-INIA` señaló que la altura máxima del tallo principal se obtuvo en la segunda y tercera época de siembra, con 95 y 96 cm, respectivamente (Figura 9b y 9c), reduciéndose a 80 cm en la quinta época de siembra (Figura 9e). El análisis individual de cada época señaló que, en la primera época de siembra, la altura máxima se observó alrededor de 140 d después de la siembra (DDS), y alcanzó 87 cm (Figura 9a); en la época 2 esta altura se logró en una fecha similar, pero alcanzó 95 cm (Figura 9b); en la época 3 se obtuvo a los 134 DDS, con 96 cm; altura similar a la época 2 (Figura 9c); en la época 4 la mayor altura fue de 92 cm a los 120 DDS (Figura 9d); y finalmente, en la época 5 la máxima altura se obtuvo a los 120 DDS, con 80 cm (Figura 9e). Estos resultados permiten señalar que la mayor altura de la planta se logró en las siembras realizadas en octubre (2^a y 3^a época). Este crecimiento en altura se fue reduciendo en las épocas de siembra posteriores. Por otro lado, el máximo de altura de la planta se obtuvo en un menor tiempo de siembra a cosecha, (140, 134, 120, 120 DDS), a medida que se atrasaba la época de siembra (Figura 9a-9e). En todas las épocas de siembra, la máxima altura de la planta se obtuvo durante los primeros estados de maduración, antes de que la panoja se doblara.

Altura de las macollas. La altura de la macolla 1 tuvo un comportamiento similar al tallo principal, en el sentido que las plantas lograron su mayor altura en las épocas 2 y 3, con 90 y 87 cm, respectivamente (Figura 10b y 10c). Por otro lado, en la época 5 las plantas de la macolla 1 obtuvieron la menor altura, 74 cm (Figura 10d). En el análisis de cada época de siembra, la máxima altura (80 cm) en la época 1, se logró a los 163 DDS (Figura 10a); en la época 2, los 90 cm se obtuvieron a los 150 DDS (Figura 10b); en la época 3, a los 134 DDS (Figura 10c); y en la época 4 y 5 alrededor a los 122 DDS (Figura 10 d y 10e).

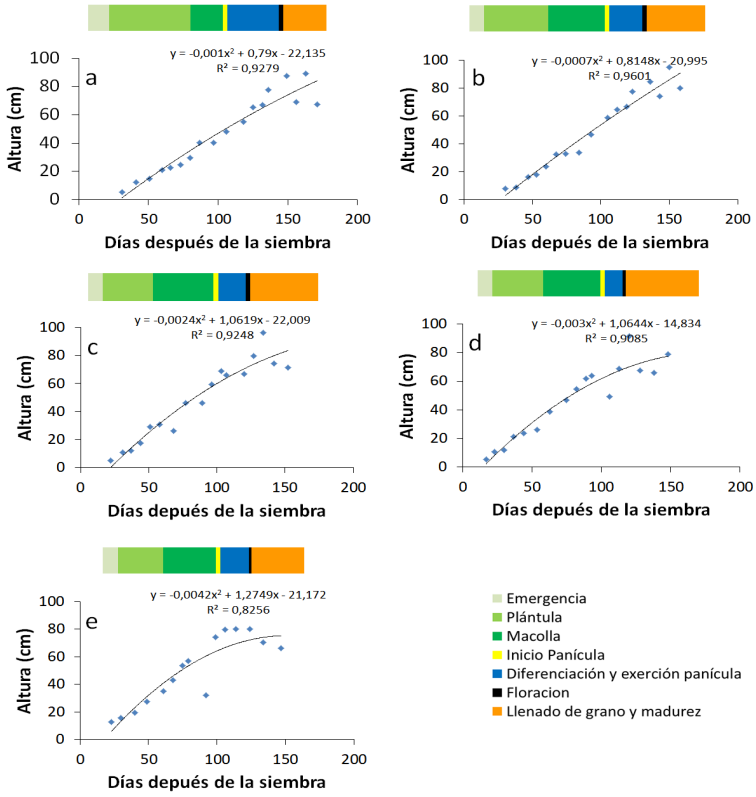


Figura 9. Altura (cm) del tallo principal de la planta de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

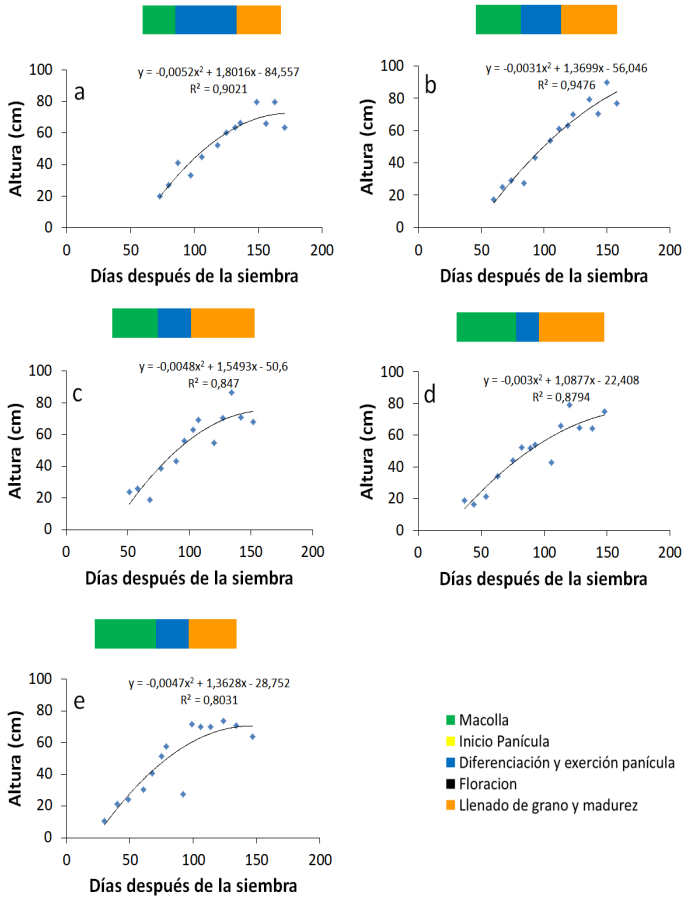
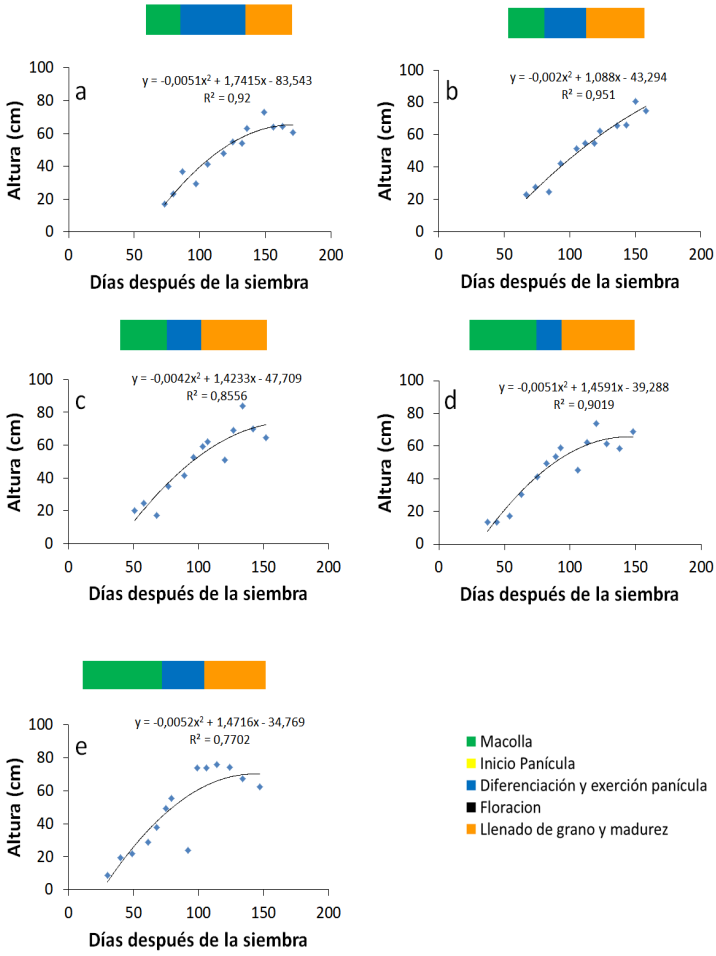


Figura 10. Altura (cm) de la macolla N° 1 de la planta de arroz, evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra con la variedad ´Zafiro-INIA`: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

La máxima altura de la macolla 2 fue inferior a la obtenida en la macolla 1, en todas las épocas de siembra. Sin embargo, el máximo de altura se obtuvo también en las épocas de siembra 2 y 3, con valores de 81 y 84 cm, respectivamente (Figura 11 b y c). Estas alturas se obtuvieron alrededor del mismo tiempo que la macolla 1. Los valores de altura de la macolla 2, en las épocas 1, 4 y 5, fueron similares y variaron entre 73 y 75 cm (Figura 11 a, d y e), valores que se obtuvieron más temprano que los de la macolla 1.

Figura 11. Altura (cm) de la macolla N° 2 de la planta de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.



En el caso de la macolla 3, las alturas máximas de las plantas fueron inferiores a la macolla 2 en todas las épocas de siembra. En varios casos se lograron en una fecha similar a las fechas obtenidas en la macolla 2, lo que indica que la velocidad de crecimiento fue mayor, aunque lograron una menor altura (Figura 12 a, b, c, d, e).

B. Acumulación de materia seca total

Tallo principal. La producción de materia seca en la planta de arroz es lenta durante los primeros 30 a 40 DDS, ya que logra acumular un bajo porcentaje del total de la materia seca producida por la planta (Figura 13 a, b, c, d, e). Con posterioridad a este período, la producción de materia seca es muy rápida y adquiere, prácticamente, un crecimiento lineal. En este período de mayor acumulación de materia seca, se inicia la producción de las macollas y el crecimiento de otras estructuras de la planta. En este caso, la máxima acumulación de materia seca se logra al final del llenado del grano (Figura 13 a, b, c, d, e).

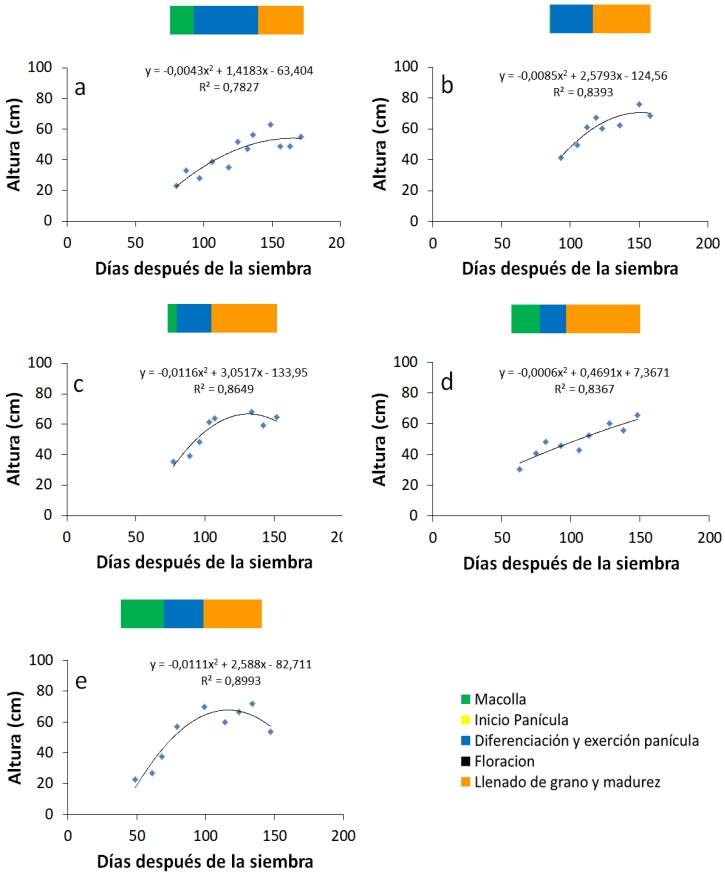


Figura 12. Altura (cm) de la macolla N° 3 de la planta de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

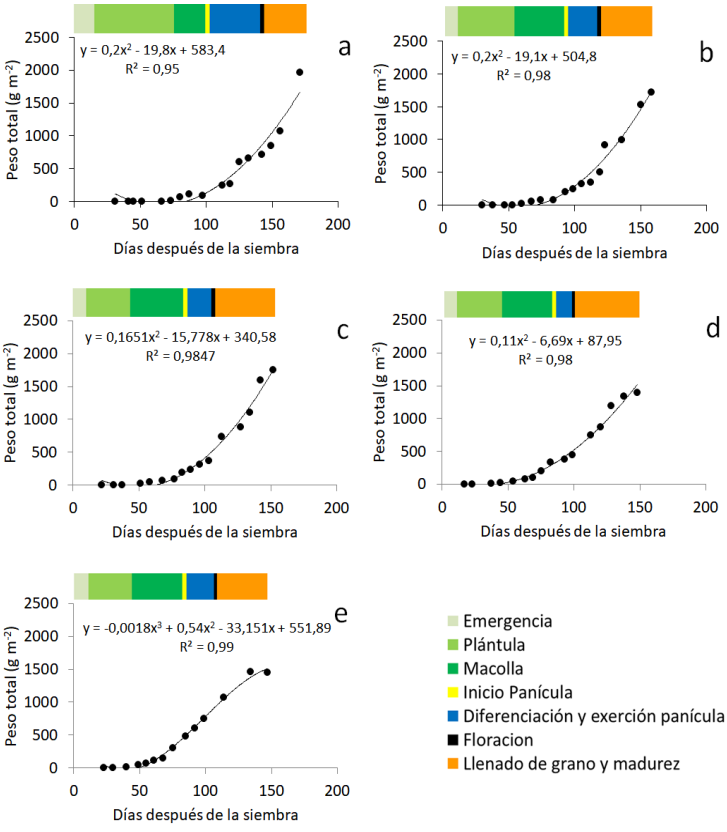


Figura 13. Acumulación de materia seca (g m^{-2}) de plantas de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

La cantidad de materia seca que es capaz de acumular la planta de arroz depende de factores genéticos (variedad), ambientales (clima y manejo agronómico) y de la interacción de estos factores. En este caso, la acumulación de materia seca de la variedad ´Zafiro-INIA` está influenciada directamente por la época de siembra y las condiciones ambientales asociadas a ellas. Es así como, las diferentes épocas de siembra presentan diferentes curvas de acumulación de materia seca, siendo superior la acumulación de materia seca en siembras tempranas (Figura 13 b, c) en comparación con épocas más tardías (Figura 13 d, e). Sin embargo, el patrón general de acumulación de la materia seca es similar en todas las épocas de siembra, es decir, una menor acumulación en los primeros estados de desarrollo y una rápida acumulación posterior, observándose diferencias en la velocidad de acumulación de la materia seca en los diferentes estados de desarrollo de la planta. En las siembras tempranas la velocidad de acumulación de materia seca es menor, ya que la planta posee un mayor número de desde siembra a cosecha (Figura 13 a), en comparación a una planta sembrada en una época tardía, donde el tiempo de siembra a cosecha es menor (Figura 13 d, e). Esto se ve reflejado, finalmente, en el rendimiento y en el índice de cosecha.

Hojas (g m^{-2})

Cuando emerge la planta, emerge el prófilo, la primera hoja que no tiene lámina, considerada como hoja cero, la cual muere alrededor del octavo o décimo día. Hasta ese momento, el desarrollo de la plántula depende de las reservas de la semilla. A partir de la emergencia de las primeras hojas verdaderas, la plántula comienza a fotosintetizar sus propios requerimientos energéticos y a absorber nutrientes de suelo, empezando su crecimiento independiente. Las hojas verdaderas se nombran como primera, segunda, etc. El orden de aparición, y el número de hojas completamente desarrolladas, son indicadores del estado de desarrollo de la planta.

Cuando la planta tiene cuatro hojas, se inicia el período de la macolla que puede durar entre 45 y 50 d, comenzando posteriormente el período de crecimiento más rápido de la planta (Figura 14). Este período y la velocidad de crecimiento de las hojas están relacionados, en este caso, con las condiciones asociadas a la época de siembra, siendo mayor en las primeras épocas de siembra comparadas con las últimas épocas (Figura 14).

No todas las hojas que nacen y se desarrollan llegan hasta el final del ciclo de desarrollo de la planta, algunas de ellas mueren mientras otras se desarrollan. A floración y madurez, el número de hojas activas fue bajo y pudiendo variar entre cinco a seis hojas y dos a tres hojas, respectivamente. La acumulación de materia seca de las hojas en cada macolla fue diferente, siendo mayor en la macolla N° 1 comparada con la macolla N° 3. La cantidad de hojas que produce una planta de arroz por área de superficie (índice de área foliar) a floración está relacionada, hasta cierto nivel, directamente con el rendimiento del grano, ya que afecta la cantidad de carbohidratos disponibles en la planta para el desarrollo y llenado de los granos.

El aumento del índice de área foliar incrementa la producción de material seca, aunque esta relación tiene un límite donde, el sombreado de las hojas reduce la tasa promedio de fotosíntesis por superficie. Sin embargo, como la producción de material seca es un balance entre fotosíntesis y respiración, la tasa del crecimiento del cultivo aumenta con el incremento del índice de área foliar.

Tallos (g m^{-2})

Durante los primeros estados de desarrollo de la planta, se presenta una sincronización entre la aparición de cada macolla, con la emergencia de las hojas en el tallo principal. Por ejemplo, la aparición de la cuarta hoja en el tallo principal coincide con la aparición de la primera hoja en la primera macolla y así sucesivamente.

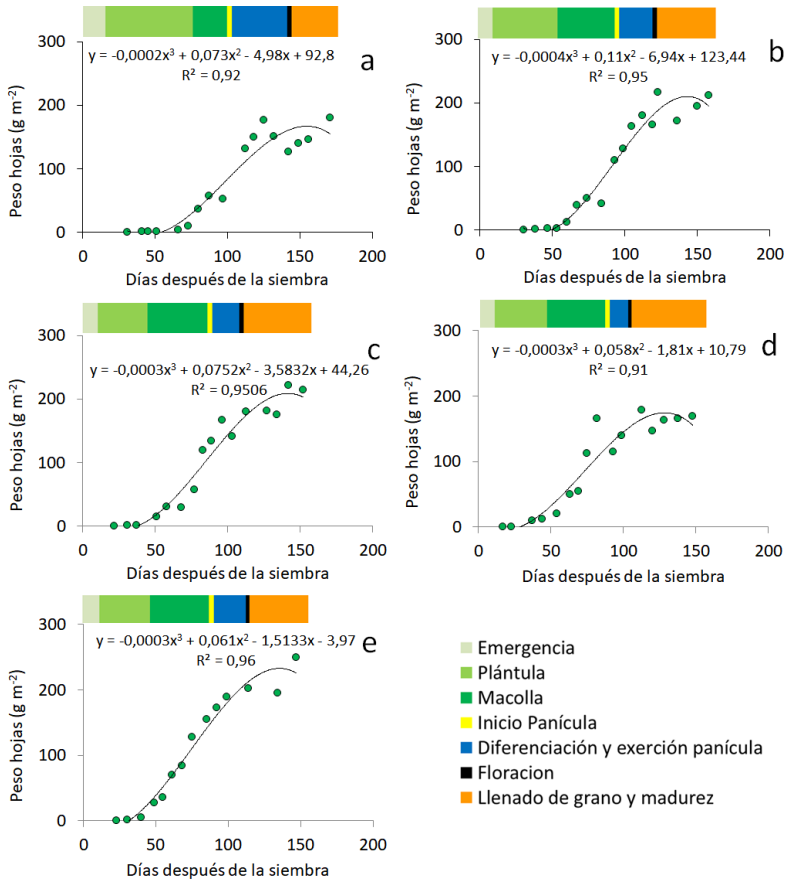


Figura 14. Acumulación de materia seca de hojas (g m^{-2}) en plantas de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

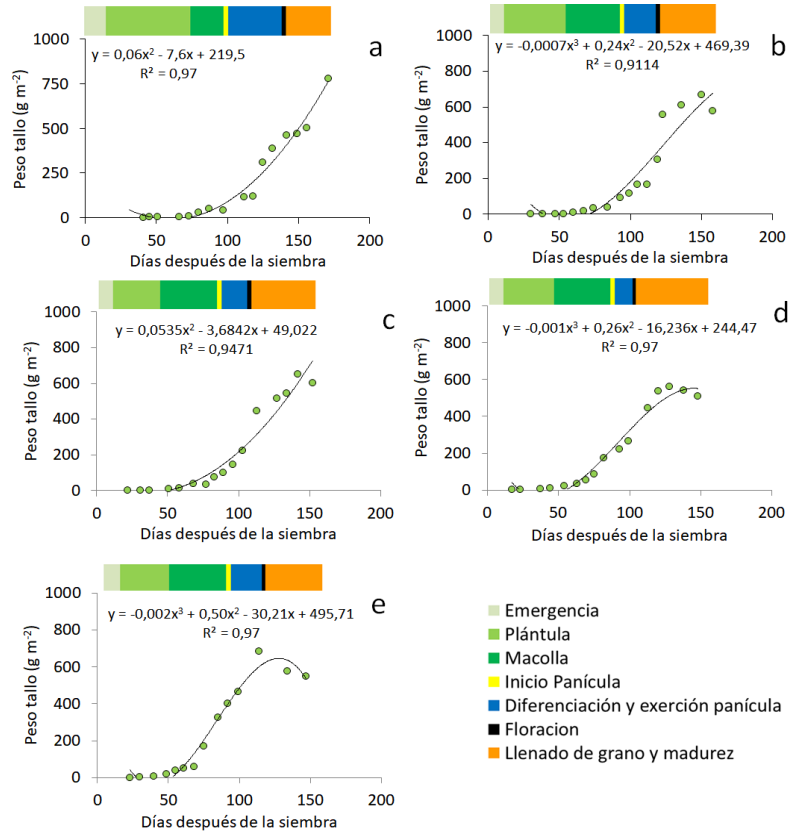


Figura 15. Acumulación de materia seca de tallos (g m^{-2}) en plantas de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

La acumulación de la materia seca de los tallos comienza a aumentar rápidamente, cuando el tallo principal comienza a elongarse (Figura 15), lo que coincide con el inicio del desarrollo de la panícula y cuatro entre nudos debajo de ella. La máxima acumulación de materia seca de los tallos ocurre posterior a la floración.

El número de macollas producido en la planta fueron tres, independiente de la época de siembra. Sin embargo, la acumulación de la materia seca del tallo principal fue mayor que la de las macollas y dentro de las macollas. La primera tuvo la mayor acumulación de materia seca comparada con la segunda y tercera macolla.

Panoja o panícula (g m^{-2})

La acumulación de la materia seca de la panícula incluye el raquis, las ramas que nacen del raquis y los granos. El inicio de la acumulación de la materia seca de la panícula es considerado desde cuando está dentro de la vaina de la hoja bandera, hasta la madurez del grano (Figura 16).

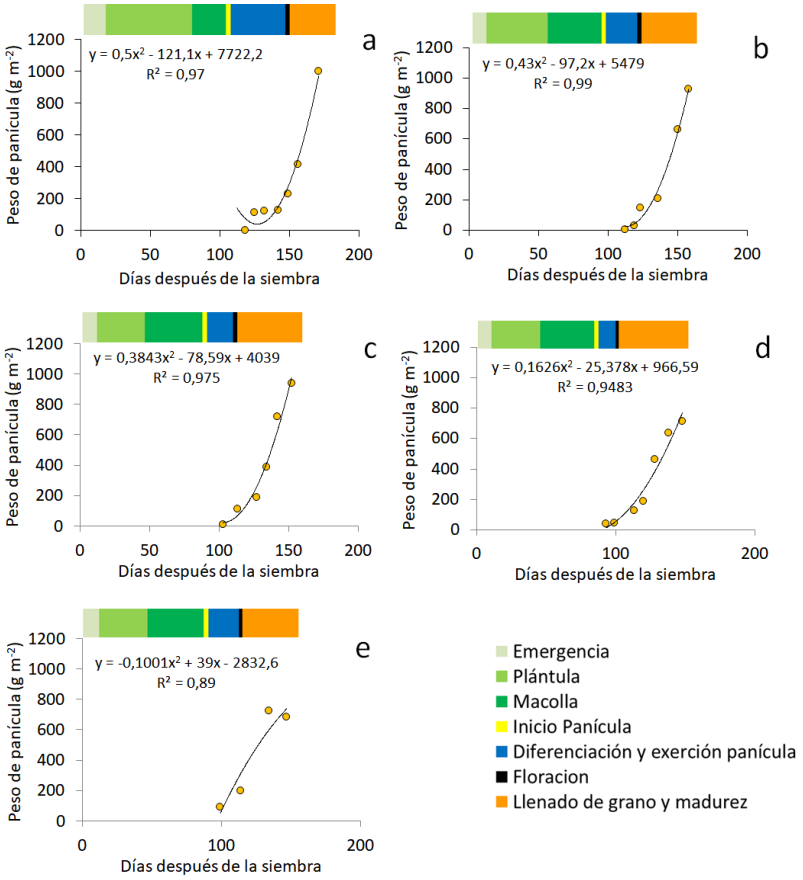


Figura 16. Acumulación de materia seca de panículas (g m^{-2}) en plantas de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

El proceso de llenado del grano, considerado como el número de necesario para que éste alcance su peso máximo, presenta una curva de crecimiento sigmoidea, con un inicio lento, una fase prácticamente lineal y un término lento hacia el final del proceso. Dentro de este proceso, la fase lineal o efectiva es la que más influye sobre el rendimiento final del cultivo y puede variar entre las variedades, localidades y temperaturas (Figura 16).

El desarrollo de la panícula comprende varios estados que incluye: a) la diferenciación del meristema en el punto de crecimiento que inicia el desarrollo del primordio de la panícula (diferenciación nudo-cuello), y marca el final de la etapa vegetativa y el inicio de la reproductiva.

En este estado el primordio no es visible, pero en aproximadamente 10-11 d aparece como un punto de crecimiento de 0,5 a 1,5 mm de longitud, lo que da por concluido el proceso de diferenciación del meristema; b) este proceso continúa con la diferenciación de la panícula, o sea, de los primordios de las ramas secundarias en el raquis, dando inicio al desarrollo de las espiguillas y donde se determina el número potencial de granos por espiguilla (Figura 17). La diferenciación de la panícula comienza cuando ésta alcanza alrededor de 5 cm de longitud. Cualquier estrés que sufra la planta en este estado, afectará negativamente el rendimiento. Por lo tanto, el desarrollo de la panícula se extiende desde su diferenciación hasta su aparición de la vaina de la hoja bandera. El desarrollo de la panícula dentro de la vaina, produce el embuchamiento; c) la salida de la panícula de la vaina de la hoja bandera, marca el inicio de la floración. Se expresa visiblemente con la exposición de las anteras fuera de las espiguillas, una vez ocurrido el proceso de autofecundación.

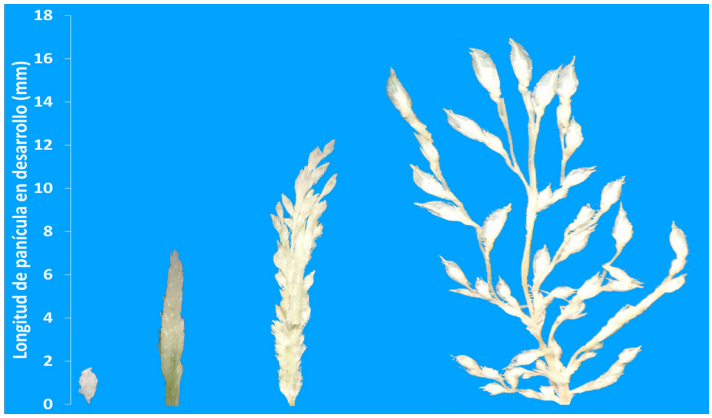


Figura 17. Crecimiento y desarrollo inicial de la panícula dentro de la parte inferior del tallo.

La antesis de la flor ocurre primero en el tercio superior de la panoja, seguido por el segmento medio y finalmente por el inferior. Para evaluar este proceso, se procedió a dividir la panoja en tres tercios y a cuantificar cada segmento por separado. La acumulación de la materia seca indica que los granos del tercio superior de la panoja son más pesados que los de los dos tercios inferiores (Figura 18 a, b). El llenado del grano pasa por varios estados, lechoso, harinoso y finalmente grano maduro. Debido al aumento de peso y a que la planta alcanza su máxima acumulación de materia seca, la panícula se dobla, las ramas de la panoja se separan, y las espiguillas cuelgan debido al peso de los granos.

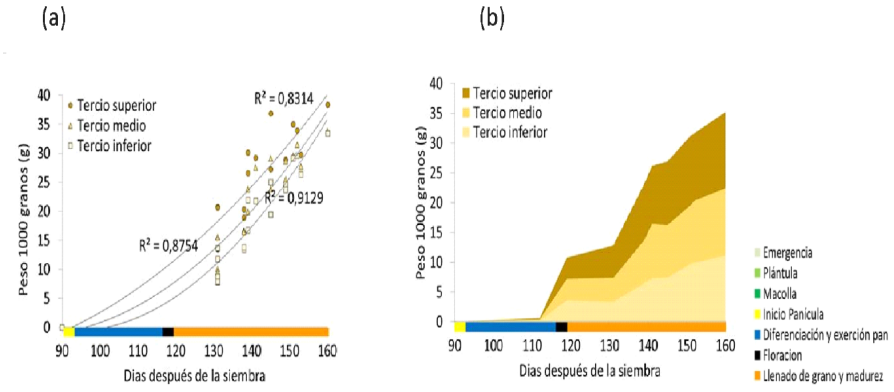


Figura 18. (a) Peso de 1.000 granos (g) de arroz. (b) distribución de pesos ubicados en el tercio superior, medio e inferior de la panoja, variedad ´Zafiro-INIA`. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

Distribución de la materia seca de la planta en sus diferentes estructuras

La distribución de la producción de materia seca total de la planta la puede representar el índice de cosecha (IC). El índice de cosecha representa la proporción de la producción de grano, en relación a la materia seca total producida, excluyendo la raíz (Donald y Hamblin, 1976; Hay, 1995; Jun, 1997; Sinclair, 1998).

El IC de cada época de siembra muestra un valor cercano al 50 %, lo que indica que la mitad de la producción de materia seca que produjo la planta está representada por el grano y la otra mitad está distribuida en hojas y tallos. La distribución gráfica de la producción de materia seca en las plantas, señala una diferente acumulación de materia seca de los tallos, hojas y panojas a través de los estados de desarrollo. Es así como, el peso seco del tallo fue el principal componente en el estado vegetativo y las panojas lo fueron en el estado reproductivo (Figura 19).

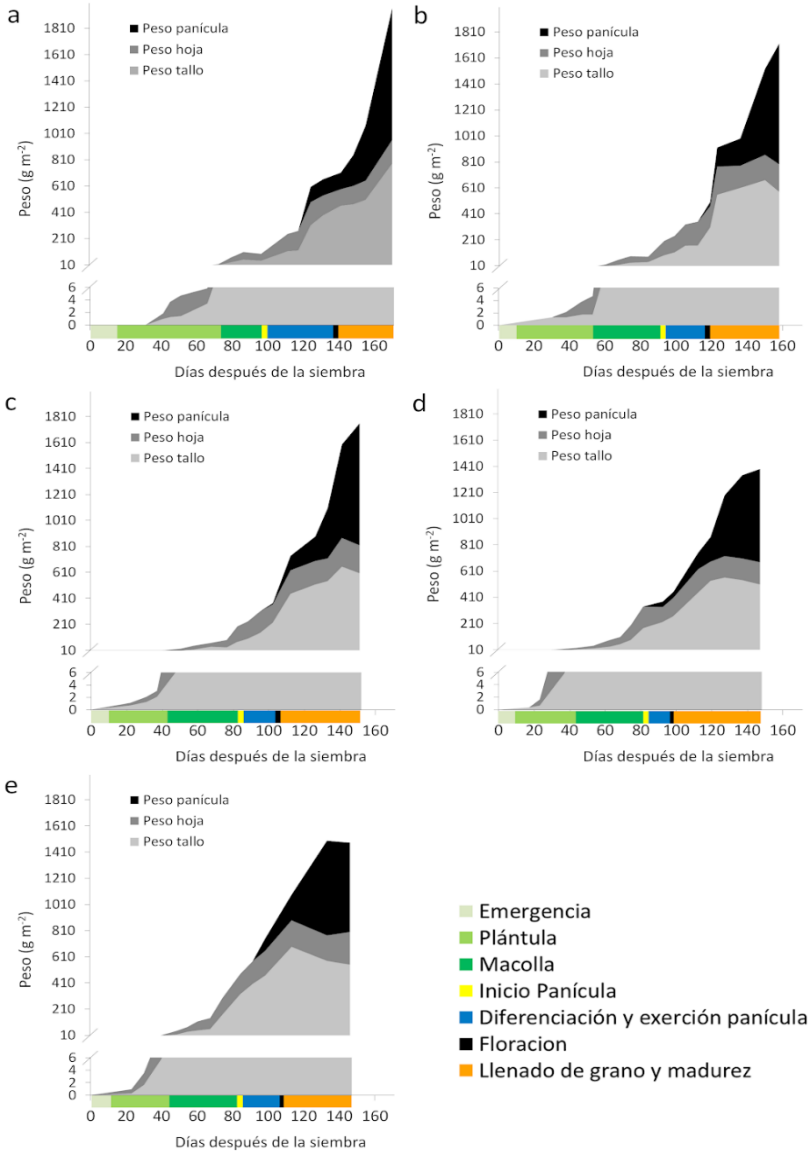


Figura 19. Distribución de la acumulación de materia seca de tallos, hojas y panoja de la planta de arroz variedad ´Zafiro-INIA` (g m^{-2}), evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

Características agronómicas de importancia comercial

La altura final de la planta en las cinco épocas de siembra no presentó diferencias significativas (Figura 20 a). La esterilidad floral fue significativamente menor en la primera época de siembra que la observada en todas las otras épocas (Figura 20 b).

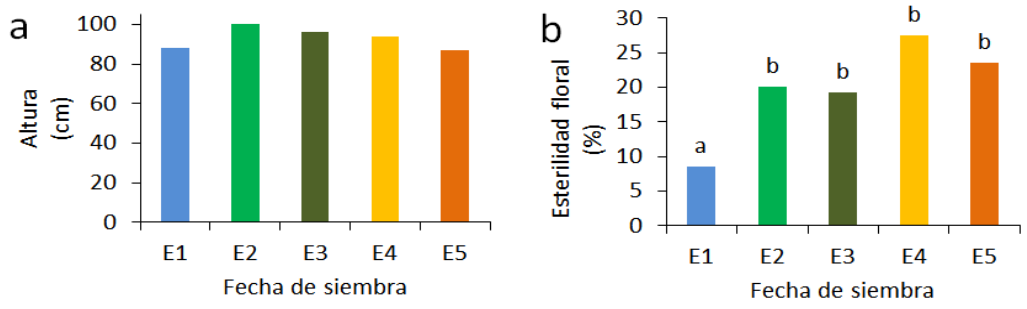


Figura 20. (a) altura de la planta (cm) a cosecha. (b) esterilidad floral (%) en diferentes épocas de siembra. Variedad ´Zafiro-INIA`. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

El rendimiento en grano paddy fue significativamente superior en las tres primeras épocas de siembra, comparada con las dos últimas (Figura 21 a). Mientras que, en el rendimiento industrial, el porcentaje de grano entero no presentó diferencias significativas entre las épocas de siembra (Figura 21 b).

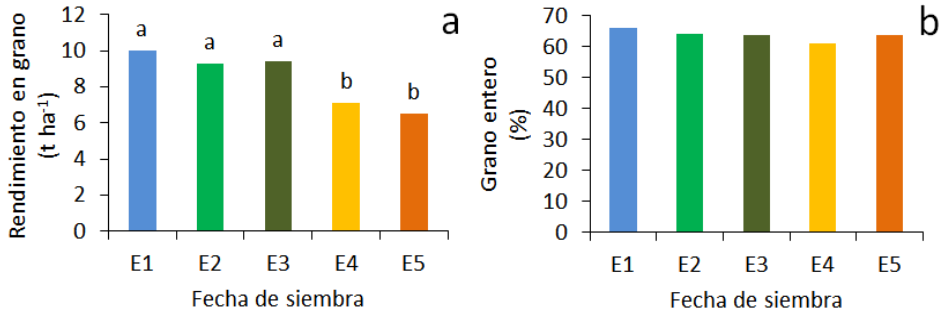


Figura 21. (a) rendimiento en grano paddy (t ha^{-1}). (b) porcentaje de grano entero (%) en diferentes épocas de siembra. Variedad ´Zafiro-INIA`. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

El rendimiento promedio del grano paddy a nivel nacional oscila en torno a las 6,5 t ha^{-1}, por lo cual el rendimiento es de 40,6 kg ha^{-1} d^{-1}, considerando 160 d de siembra a cosecha, o 43,3 kg ha^{-1} con 150 d de siembra a cosecha, lo cual es inversamente proporcional a la duración del período de crecimiento de la planta. Ahora, si consideramos, el rendimiento experimental de 10 t ha^{-1}, el rendimiento puede variar entre 62,5 y 66,7 kg ha^{-1} d^{-1}, dependiendo del período de siembra a cosecha, y en el caso del rendimiento potencial de 12 t ha^{-1}, el rendimiento estaría entre 75 y 80 kg ha^{-1} d^{-1}. Por ello, es importante considerar que existe un margen para poder aumentar el rendimiento nacional, si se considera que algunos agricultores han alcanzado rendimientos de 10 o 12 t ha^{-1} en superficies de un par de hectáreas (Parada y Paredes, 2014).

El índice de cosecha es una característica que ha sido considerada en los programas de mejoramiento de arroz como una vía para aumentar el rendimiento, ya que representa la integración de varios procesos que incluyen la formación del número de panículas por área, el número de espiguillas por panícula, el porcentaje de granos llenos y el peso de los 1.000 granos maduros (Terao et al., 2010). El IC es una característica compleja y difícil de mejorar, debido a su naturaleza poligénica (Jun, 1997; Sabouri et al., 1999; Mao et al., 2003; Zhang et al., 2017b), a las condiciones ambientales (Yoshida, 1981; Prasad et al., 2006) y al manejo agronómico (Yang y Zhang, 2010).

Por otro lado, varios estudios han determinado correlaciones negativas entre el IC y la altura de plantas (Marri et al., 2005; Sabouri et al., 1999; Li et al., 2012), emisión de panoja, peso de la planta y largo de la panícula (Li et al., 2012), y correlaciones positivas entre el IC y el número de granos por panícula, porcentaje de espiguillas fértiles, peso de los granos y rendimiento por planta (Marri et al., 2005) y el peso del grano por panícula (Li et al., 2012). El IC en el experimento varió entre un 47 %, obtenido en la última época de siembra, y un 53 % a 54 % obtenido en la segunda y tercera época de siembra. La primera y cuarta época obtuvieron un IC de un 51 % (Figura 22).

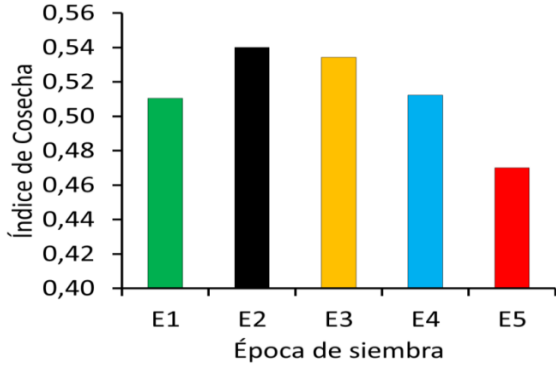


Figura 22. Índice de cosecha en cultivo de arroz variedad ´Zafiro-INIA`, determinado en ensayos con diferentes épocas de siembra (E1 a E5). San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

Modelos de simulación. En las últimas décadas se han desarrollado varios modelos de simulación que integran variables climáticas y productivas, con el objetivo de predecir el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo bajo diferentes condiciones (Bouman et al., 1996). Entre estos modelos están CERES-RICE (Tsuji et al., 1994), RiceGrow (Tang et al., 2009; Artacho et al., 2011; Zhang et al., 2015; Li et al., 2017).

Conclusiones

Por primera vez, durante la temporada 2015-2016 se evaluó el crecimiento y desarrollo de plantas de la variedad ´Zafiro-INIA` sembradas en cinco fechas de siembra, en la localidad de San Carlos. Ello significó evaluar un genotipo con un manejo agronómico estándar, los efectos de la temperatura, radiación y acumulación de los grados día (°C) sobre la duración de los ciclos vegetativo y reproductivo de la planta, y describir el crecimiento y desarrollo de ella para dos características: la altura (cm) y la acumulación de la materia seca (g m^{-2}). Además, se pudo evaluar el índice de cosecha, esterilidad y su rendimiento productivo e industrial.

Las primeras fases del estado vegetativo, plántula y macolla, presentaron un comportamiento diferente, dependiendo de la época de siembra del arroz. Pero en general, el estado vegetativo total se acortó a medida que se atrasó la época de siembra.

La variedad que se siembra en la época recomendada, tiene el potencial de lograr un mayor rendimiento, en comparación con una variedad sembrada muy temprano o más tarde, debido a que las condiciones climáticas pueden ser adversas en el inicio, durante o al final del crecimiento y desarrollo de la planta. Bajas temperaturas en la siembra, pueden alargar el período de emergencia de la planta, y afectar la etapa reproductiva de la planta, reduciendo el rendimiento. Altas temperaturas al estado reproductivo, afectan el desarrollo del grano y la calidad.

Por otro lado, en términos agronómicos y productivos, la altura de la planta no fue afectada significativamente, en cambio, el nivel de esterilidad de la panícula sí se afectó significativamente en la primera fecha de siembra. Los cambios sobre el IC no fueron significativos. El rendimiento en grano paddy fue significativamente superior en las tres primeras épocas de siembra, comparado con las dos últimas épocas. El rendimiento industrial, medido como porcentaje de grano entero, no presentó diferencias significativas entre las épocas de siembra.

Referencias

Abou-Khalifa, A., Misra, A., El-Azeem, A., et al. 2008. Effect of leaf cutting on physiological traits and yield of two rice cultivars. Afr. J. Plant Sci. 2:147-150.

Ali, M., Naylor, R., Matthews, S. 2006. Distinguishing the effects of genotype and seed physiological age on low temperature tolerance rice (*Oryza sativa* L.). Exp. Agric. 42:337-349.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 1995. Manual de producción de arroz. Programa de Reconversión de suelos arroceras. Serie Quilamapu N° 62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2007. Antecedentes generales sobre el arroz en Chile. p.7-20. En Alvarado, R (ed.). Arroz Manejo Tecnológico Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Pino, A. 1980. Efecto de la época de siembra sobre el rendimiento de cuatro variedades de arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu 3:7-11

Artacho, P., Meza, F., Alcalde, J. 2011. Evaluation of Oryza2000 growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated Mediterranean environment. Chil. J. Agric. Res. 71:23-33.

Baruah, A., Ishigo-Oka, N., Adachi, M., et al. 2009. Cold tolerance at the early growth stage and cultivated rice. Euphytica 165:459-470.

Buchanan-Wollaston, V. 1997. The molecular biology of leaf senescence. J. Exp. Bot. 48:181-199.

Cock, J., Yoshida, S. 1972. Accumulation of ^{14}C-labelled carbohydrate before flowering and subsequent redistribution and respiration in the rice plant. Proc. Crop Sci. Soc. Jpn. 41:226-234.

Cordero, K., Hernaíz, S., Saavedra, F., et al. 2010a. Zafiro-INIA, nueva variedad de arroz para el mercado chileno. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

Cordero, K., Hernaíz, S., Saavedra, F., et al. 2010b. Cuarzo-INIA, variedad de alto rendimiento de campo y calidad industrial. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

Counce, P., Keisling, T., Mitchell, A. 2000. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. Crop Sci. 40:436-443.

Donald, C., Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. Adv. Agron. 28:361-405.

Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V. 2013. Study of pollen development in rice under controlled conditions. VIII Reunión anual de la Sociedad de Biología Vegetal, Pucón.

Donoso, G., Paredes, M. 2015. Efecto de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz. p. 18-21. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V. 2018. Época de siembra de la variedad Digua Cl. p.26-28. En Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. (eds.). Arroz sustentable: Sistema de producción de arroz Clearfield. Boletín N° 397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Ellis, R. 2011. Rice seed quality development and temperature during late development and maturation. Seed Sci. Res. 21:95-101.

Ellis, R., Hong, T. 1994. Desiccation tolerance and potential longevity of development seeds of rice (*Oryza sativa* L.). Ann. Bot. 73:501-506.

Fageria, N. 2007. Yield physiology of rice. J. Plant Nutr. 30:843-879.

Farrel, T., Fox, K., Williams, R., et al. 2006. Minimizing cold damage during reproductive development among rice genotypes. II. Genotypic variation and flowering traits related to cold tolerant screening. Aust. J. Agric. Res. 57:89-100.

Fu, J., Huang, Z., Wang, J., et al. 2011. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice. Field Crops Res. 123:170-182.

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.

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

Gunawardena, T., Fukai, S., Blamey, F. 2003. Low temperature induced spikelet sterility in rice. I: Nitrogen fertilization and sensitive reproductive period. Aust. J. Agric. Res. 54:937-946.

Hay, R. 1995. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. Annu. Appl. Biol. 126:197-216.

Hayashi, M. Hayashi, T., Kuno, C., et al. 2013. Enhanced nitrogen uptake and photosynthesis of rice grown with deep and permanent irrigation method: possible mechanism for chalky grain reduction. Plant Prod. Sci. 16:309-316.

He, H., Yang, R., Jia, B., et al. 2014. Rice photosynthetic productivity and PSII photochemistry under nonflooded irrigation. Sci. World J. 2014: 839658.

Henríquez, R., Henríquez, G., Sepúlveda, D., et al. 2018. Siembra. p. 52-58. En Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas de arroz en Chile. Serie estudios para la innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.

Hubbart, S., Peng, S., Horton, P., et al. 2007. Trends in leaf photosynthesis in historical rice varieties developed in the Philippines since 1996. J. Exp. Bot. 58:3429-3438.

Imin, N., Kerim, T., Weinman, J., et al. 2006. Low temperature at the young microspore stage induces protein changes in rice anthers. Mol. Cell Proteomics 5:274-292.

Jagadish, S., Craufurd, P., Wheeler, T. 2007. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). J. Exp. Bot. 58:1627-1635.

Jagadish, S., Muthurajan, R., Wheeler, T., et al. 2010. Physiological and proteomic approaches to address heat tolerance during anthesis in rice (*Oryza sativa* L.). J. Exp. Bot. 61:143-156.

Julia, C., Dingkuhn, M. 2012. Variation in time of day of anthesis in rice in different climatic environments. Eur. J. Agron. 43:166-174.

Jun, F. 1997. Formation of harvest index in rice and its improvement. Crop Res. 2:1-3.

Karki, S., Rizal, G., Quick, W. 2013. Improvement of photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.) by inserting the C4 pathway. Rice 6:28.

Khalifa, A. 2009. Physiological evaluation of some hybrid rice varieties under different sowing dates. Aust. J. Crop Sci. 3:178-183.

Koller, E. 1958. El cultivo del arroz en la provincia de Ñuble y su terminología. p. 87-103. Boletín de Filología. Instituto de Filología de la Universidad de Chile. Tomo IX, 1956-1957. Edit. Universitaria, S.A., Santiago, Chile.

Li, T., Angeles, O., Marcaida, M., et al. 2017. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. Agric. For. Meteorol. 237:246–256.

Li, X., Yan, W., Agrama, H., et al. 2012. Unraveling the complex trait of harvest index with association mapping in rice (*Oryza sativa* L.) PLoS ONE 7(1):e29350.

Long, S., Zhu, X., Naidu, S., et al. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yield? Plant Cell Environ. 29:315-330.

Makino, A. 2011. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat. Plant Physiol. 155:125-129.

Mao, B., Cai, W., Zhang, Z., et al. 2003. Characterization of QTLs for harvest index and source-sink characters in a DH population of rice (*Oryza sativa* L.). Acta Genet. Sin. 30:1118-1126.

Marri, P., Sarla, N., Reddy, L., et al. 2005. Identification and mapping of yield and yield related QTLs from an Indian accession of *Oryza rufipogon*. BMC Genet 13:33-39.

Martínez-Eixarch, M., Ellis, R. 2015. Temporal sensitivities of rice seed development from spikelet fertility to viable mature seed to extreme-temperature. Crop Sci. 55:354-364.

Matsui, T., Omasa, K., Horie, T. 2001. The difference in sterility due to high temperature during flowering period among *japonica*-rice varieties. Plant Prod. Sci. 4:90-93.

Matsumura, H., Zuzuki, K., Shimono, H. 2012. Water temperature during vegetative growth affect cold tolerance at booting stage of rice under controlled environment conditions. J. Agric. Meterol. 68:159-164.

Murchie, E., Yang, J., Hubbart, S., et al. 2002. Are there the association between grain-filling rate and photosynthesis in the flag leaves of field grown rice? J. Exp. Bot. 53:2217-2224.

Nakamura, T., Chiba, M., Koike, S., et al. 2000. Number of pollen grains in rice cultivars with different cool-weather resistance at the young microspore stage. Plant Prod. Sci. 3:299-305.

Okawa, S., Makino, A., Mae, T. 2003. Effect of irradiance on the partitioning of assimilated carbon during the early phase of grain filling in rice. Ann. Bot. 92:357-364.

Pan, J., Cui, K., Wei, D., et al. 2011. Relationships of non-structural carbohydrates accumulation and translocation with yield formation in rice recombinant inbreed lines under two nitrogen levels. Physiol. Plant. 141:321-331.

Parada, J., Paredes, M. 2014. Agricultores arroceros obtienen rendimiento récord en Chile en Concurso Nacional de Producción. Tierra Adentro (Ed. Especial) 106:21-23.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2016. Platino-INIA, variedad de alto rendimiento en grano y calidad industrial. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

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 N° 397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Prasad, P., Boote, K., Allen, L., et al. 2006. Species, ecotype and cultivars differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. Field Crop Res. 95:398-411.

Rahman, Md., Haque, M., Sikdar, B., et al. 2013. Correlation analysis of flag leaf with yield in several rice cultivars. J. Life Earth Sci. 8:49-54.

Restrepo, H., Garces, G. 2013. Evaluation of low light intensity at three phonological stages in the agronomic and physiological responses of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. Agron. Colombiana 31:55-60.

Roel, A., Mutters, R., Eckert, J., et al. 2005. Effect of low water temperature on rice yield in California. Agron. J. 97:943-948.

Sabouri, H., Sabouri, A., Reza, D. 1999. Genetic dissection of biomass production, harvest index and panicle characteristics in *indica-indica* crosses of Iranian rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. Aust. J. Crop Sci. 3:155-166.

Sánchez, B., Rasmussen, A., Porter, J. 2014. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. Global Change Biol. 20:408-417.

Sánchez-Reinoso, A., Garcés-Varón, G., Restrepo-Díaz, H. 2014. Biochemical and physiological characterization of three rice cultivars under different daytime temperature conditions. Chil. J. Agric. Res. 74:373-379.

San-oh, Y., Mano, Y., Ookawa, T., et al. 2004. Comparison of dry matter production and associated characteristics between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationships to planting pattern. Field Crops Res. 87:43-58.

Satake, T., Yoshida, S. 1978. High temperature-induced sterility in *indica* rice at flowering. Jpn. J. Crop Sci. 47. 6-17.

Sharifi, H., Hijmans, R., Hill, J., et al. 2018. Water and air temperature impact on rice (*Oryza sativa*) phenology. Paddy Water Environ. 16:467-476.

Shen, B-R., Wang, L-M., Lin, X-L., et al. 2019. Engineering a new chloroplastic photorespiratory bypass to increase photosynthetic efficiency and productivity in rice. Mol. Plant 12:199-214.

Shi, W., Muthurajan, R., Rahman, H., et al. 2013. Source-sink dynamics and proteomic reprogramming under elevated night temperature and their impact on rice yield and grain quality. New Phytol. 203:825-837.

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.

Shimono, H., Ishii, A., Kanda, E., et al. 2011. Genotypic variation in rice cold tolerance responses during reproductive growth as a function of water temperature during vegetative growth. Crop Sci. 51:290-297.

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.

Sims, G. 1969. El cultivo del arroz. El Campesino (Chile) 100:43-71.

Sims, G., Alvarado, R. 1972. Preparación del suelo y siembra. p. 32-50. En Manual de arroz. Servicio y Ganadero, Central de Divulgación Técnica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Estación Experimental Quilamapu, Chillán, Chile.

Sinclair, T. 1998. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. Crop Sci. 38:638-643.

Stansel, J., Bollich, C., Thysell. J., et al. 1965. The influence of light intensity and nitrogen fertility on rice yield and components of yield. Rice J. 68:34-35.

Tang, L., Zhu, Y., Hannaway, D., et al. 2009. RiceGrow: a rice growth and productivity model. NJAS Wageningen J. Life Sci. 57:83-92.

Terao, T., Nagata, K., Morino, K., et al. 2010. A gene controlling the number of primary rachis branches also controls the vascular bundle formation and hence is responsible to increase the harvest index and grain yield in rice. Theor. Appl. Genet. 120:875-893.

Tsuji, G., Uehara, G., Balas, G. 1994. DSSAT versión 3, vol. 1-3. University of Hawaii, Hawaii.

Wang, L., Lu, Q., Wen, X., et al. 2015. Enhanced sucrose loading improves rice yield by increasing grain size. Plant Physiol. 169:2848-2862.

Wang, Z., Zhang, F., Xiao, F., et al. 2018. Contribution of mineral nutrients from source to sink organs in rice under different nitrogen fertilization. Plant Growth Regul. 86:159-167.

Wu, H., Xiang, J., Zhang, Y., et al. 2018. Effects of post-anthesis nitrogen uptake and translocation on photosynthetic production and rice yield. Sci. Rep. 8:12891.

Xiong, D., Yu, T., Ling, X., et al. 2015. Sufficient leaf transpiration and non-structural carbohydrates are beneficial for high-temperature tolerance in three rice (*Oryza sativa*) cultivars and two nitrogen treatments. Funct. Plant Biol. 42:347-356.

Yamamoto, T., Zuzuki, T., Zuzuki, K., et al. 2017. Characterization of a genomic region that maintain chlorophyll and nitrogen contents during ripening in a high-yielding stay green rice cultivars. Field Crops Res. 206:54-64.

Yang, J., Zhang, J. 2010. Crop management techniques to enhance harvest index in rice. J. Exp. Bot. 61:3177-3189.

Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., et al. 2001. Remobilization of carbon reserves in response to water deficit during grain filling of rice. Field Crops Res. 71:47-55.

Yoshida, S. 1972. Physiological aspects of grain yield. Ann. Rev. Plant Physiol. 23:437-464.

Yoshida, S. 1977. Rice. p. 57-87. In: Alvin, P de T., Kozolowski, T (eds.) Ecophysiology of tropical crops. Academic Press, New York, USA.

Yoshida, S. 1981. Climatic environment and its influence. p.65-110. In Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.

Yoshida, S., Parao, F. 1976. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. p. 471-494. In Climate and rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Zeng, Y., Zhang, Y., Xiang, J., et al. 2017. Effects of low temperature stress on spikelet-related parameters during anthesis in *indica-japonica* hybrid rice. Front. Plant Sci. 8:1350.

Zhang, J., Feng, L., Zou, H., et al. 2015. Using Oryza2000 to model cold rice yield response to climate change in the Heilongjiang province, China. Crop J. 3:317-327.

Zhang, S., He, X., Zhao, J., et al. 2017b. Identification and validation of a novel major QTL for harvest index in rice (*Oryza sativa* L.) Rice 10:44.

Zhang, W., Kokubun, M. 2004. Historical changes in grain yield and photosynthetic rate of rice cultivars released in the 20th century in Tohoku region. Plant Prod. Sci. 7:36-44.

Zhang, J., Li, G., Huang, Q., et al. 2017a. Effects of culm carbohydrate partitioning on basal stem strength in a high-yielding rice population. Crop J. 5:478-487.

Zhang, Y., Tang, Q., Zou, Y. 2009. Yield potential and radiation use efficiency of "super" hybrid rice grown under subtropical conditions. Field Crops Res. 96:37-47.

Zhu, G., Peng, S., Huang, J., et al. 2016. Genetic improvement in rice yield and concomitant increases in radiation-and nitrogen-use efficiency in middle reaches of Yangtze river. Sci. Rep. 6:21049.

VALTRA
BM125i

GASPARDO

SECCIÓN VII. AGRONOMÍA

Capítulo 16. Fertilización del cultivo de arroz

Juan Hirzel C.

Antecedentes nutricionales del cultivo

Nitrógeno

El nitrógeno (N) debe ser suministrado de manera constante al cultivo para lograr una cosecha adecuada, especialmente durante la formación y desarrollo de la panícula. El rendimiento final está definido por el número de panículas por m^2 y también por el número de granos por panícula. A su vez, el número de panículas depende del número de macollas, quedando definido dentro de los primeros 10 d posteriores al máximo número de macollas. Los componentes anteriores están influenciados por la disponibilidad de N durante estos estados de desarrollo (Kumura, 1956; Singh y Murayama, 1963). Por su parte, el número de espiguillas por panícula se relaciona estrechamente con el contenido de N que presenta la vaina foliar durante las semanas previas a floración (Kumura, 1956; Shimizu, 1967). Finalmente, el N influirá en una eficiente asimilación de carbohidratos por parte del grano, y en un correcto llenado del mismo.

El N es absorbido durante las primeras fases de crecimiento de la planta de arroz en la forma amoniacal (NH_4^+) (Grist, 1975; Tinarelli, 1989), mientras que en las fases cercanas a madurez es preferido en forma de nitrato (NO_3^-). El N en forma de amonio es favorable hasta el estado de iniciación de panículas (Tanaka et al., 1959). Posteriormente se ve favorecida la absorción de nitrato, sobre todo durante la fase de formación embrionaria de la panícula, estimulando el incremento en el número de flores de la panícula y en el peso de los granos (Atanasiu y Samy, 1985; Tinarelli, 1989). El N amoniacal, por su parte, aumenta el número de macollas y el número de panículas por planta (Atanasiu y Samy, 1985). Si bien en condiciones de suelo inundado es preferible aplicar las formas amoniacales de N, o que deriven en amonio (urea), dependiendo de la profundidad de laboreo, en los primeros 5 a 10 cm de suelo se presenta una condición aeróbica que permitiría la transformación de amonio a nitrato, proceso que es acelerado por la acumulación de temperatura. No obstante, lo señalado anteriormente, en nuestro país no hay evidencia científica en las variedades modernas que indique las ventajas de realizar aplicaciones de N a la forma de nitrato posteriores a la siembra.

Los excesos de N, sobre todo asociados a fenómenos climáticos anormales durante la fase reproductiva, especialmente bajas temperaturas (Tinarelli, 1989), generan desórdenes de crecimiento y distribución interna de este nutriente que favorecen el crecimiento vegetativo, pudiendo retardar la cosecha y reducir el rendimiento (Hirzel et al., 2011; Hirzel y Rodríguez, 2013).

En relación a la distribución interna de N en la planta de arroz, estudios realizados con N^{15} indican que entre 3 y 5 % se encuentra en las raíces, entre el 30 y 44 % en las estructuras vegetativas aéreas, entre el 37 y 40 % en la panícula, y entre el 7 y 13 % se encuentra en las estructuras senescentes (Sheehy et al., 2004).

Fósforo

Este elemento debe estar disponible durante todo el ciclo de crecimiento de la planta de arroz. Si bien los niveles de disponibilidad encontrados en el análisis de suelo (método Olsen) suelen mostrar valores inferiores a los considerados críticos para la mayoría de otras especies vegetales, la práctica de fertilización con dosis moderadas de fósforo (P) al momento de la siembra (40-60 kg P_2O_5 ha^{-1}) permite contar con un suministro normalmente adecuado para el cultivo. Esto se debe a que la dinámica de este nutriente en suelos inundados coincide con una mayor solubilidad del

P naturalmente presente en los suelos por incrementos de pH bajo inundación, lo cual solubiliza los fosfatos de hierro (Fe) y aluminio (Al), y aumenta la reducción del Fe y, por tanto, su solubilidad (Tinarelli, 1989).

En términos generales, el P favorece el crecimiento radical y mejora la absorción de agua y otros nutrientes. Adicionalmente, aumenta la resistencia a períodos de menor disponibilidad de agua. Un suministro adecuado de P mejora la floración y fecundación de granos, aumenta la precocidad del cultivo, y eleva el peso de los 1.000 granos (Atanasiu y Samy, 1985). La mayor absorción de P se presenta durante el período de desarrollo vegetativo y se reduce después de la formación embrionaria de la panícula (Tinarelli, 1989). A su vez, la absorción es favorecida por incrementos de temperatura, con un óptimo de 30 °C.

De acuerdo a la condición de pH que presentan los suelos usados para el cultivo de arroz en Chile (leve a moderadamente ácidos) y al valor de la unidad fertilizante (costo de 1 kg de P_2O_5), la fuente de P más usada es el superfosfato triple (de reacción neutra). Por su parte, en suelos de pH mayor a 6,0 se puede emplear el fosfato diamónico, sobre todo en las mezclas formuladas para la siembra de este cultivo. No se debe descuidar la adecuada aplicación de P al cultivo, dado que una deficiencia durante los estados vegetativos tempranos (macolla) puede generar una reducción en la síntesis proteica y, a su vez, un menor rendimiento potencial (Tinarelli, 1989). Para ello, es fundamental contar con análisis de suelo al menos cada 3 años, dado que los cambios en los niveles de fertilidad de los suelos son paulatinos, excepto cuando se realizan enmiendas químicas u orgánicas, como también fertilizaciones de corrección.

Potasio

Este elemento juega un rol importante al inicio del crecimiento vegetativo, principalmente durante la formación de macollas, teniendo una influencia directa en la determinación del número final de panículas. Durante la fase de maduración favorece la síntesis y translocación de hidratos de carbono de bajo peso molecular, interviene en la activación de procesos de fosforilación (transporte de energía) para activar el transporte de compuestos nitrogenados solubles hacia los granos en formación, evitando su acumulación en otros tejidos, y favoreciendo también el peso de los 1.000 granos (Trolldenier, 1979; Tinarelli, 1989). Además, el potasio (K) aumenta la resistencia de la planta a diversas enfermedades como, por ejemplo, a la pudrición de tallos detectada en Chile (Alvarado et al., 1991; Ortega et al., 1991; 1992), y también a condiciones climáticas adversas (altos niveles de radiación solar y temperatura, o baja temperatura durante la macolla y la floración), presentando un rol importante en la economía de uso y pérdida del agua por transpiración desde la planta (Tinarelli, 1989).

El K estimula también la división celular, participa del transporte de fotones durante la fotosíntesis, dirige la síntesis de almidón, inulina, aminoácidos y proteínas, también modifica la permeabilidad de las células e interfiere en los mecanismos de plasmólisis y turgencia, y junto al P y magnesio (Mg) participan activamente del metabolismo de los hidratos de carbono (Tinarelli, 1989).

El fertilizante potásico más usado en nuestro país para el cultivo de arroz es el muriato de potasio (KCl), el cual presenta una alta concentración de K_2O y un bajo costo por unidad fertilizante. Si bien en las décadas anteriores no se aplicaba K en el cultivo de arroz, se comenzó a aplicar por la presencia de pudrición del tallo. La sucesiva extracción por el ciclo de cultivo y el aumento paulatino en el rendimiento alcanzado, han provocado una reducción en los niveles de disponibilidad de este elemento en el suelo. De esta forma, en la actualidad se usan dosis de K_2O entre 48 y 60 kg ha^{-1} (80-100 kg de muriato de potasio), sin encontrar respuestas de rendimiento a dosis superiores.

Azufre

Este elemento es importante durante todo el ciclo de crecimiento de la planta de arroz, incidiendo fuertemente en la calidad del grano, ya que forma parte de algunos aminoácidos esenciales, del metabolismo del N, y en la síntesis de proteínas y de hidratos de carbono. Está relacionado con la reducción de nitratos, cataliza la formación de clorofila junto al cobre (Cu) y hierro (Fe), interviene como transportador de hidrógeno (H), contribuye a regular el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, y forma parte de los radicales del tipo sulfuro (SH) (Tinarelli, 1989). Las cantidades de azufre (S) absorbidas por el cultivo son relativamente bajas en comparación a otros nutrientes (N y K), siendo cubiertas por el aporte natural de los suelos (mineralización de la materia orgánica), por lo cual es poco común aplicar fertilizantes azufrados en el cultivo de arroz. Por otra parte, el uso de superfosfato triple entrega pequeñas cantidades de S (1 % por kilogramo de fertilizante) que pueden variar entre 0,8 y 1,3 kg S ha^{-1} (80 a 130 kg de superfosfato triple ha^{-1}). Sin embargo, es necesario evaluar periódicamente la disponibilidad de este nutriente a través de un análisis químico de suelo.

Calcio y magnesio

El calcio (Ca) contribuye a la rigidez de las plantas y aumenta la resistencia a la tendedura. Por su parte, el magnesio (Mg) se localiza en los anillos pirrólicos que constituyen la clorofila, participando como catalizador en las actividades enzimáticas de las nitrato-reductasas o enzimas autoinducidas que requieren presencia de molibdeno (Mo) (Tinarelli, 1989).

Estos elementos son extraídos en pequeña cantidad por la planta de arroz. Cuando se realiza la labor de incorporación del residuo en pie o la quema de rastrojos (ingreso de cenizas al suelo) en la preparación de suelo, se devuelve gran parte del Ca y Mg extraído por el cultivo de arroz anterior, como también de K (Tinarelli, 1989). El contenido de estos nutrientes en el suelo está relacionado con el pH, aumentando el nivel de disponibilidad cuando el pH es más alto. Por ello, en la mayoría de los suelos donde se cultiva arroz (pH entre 5,5 y 6,5) existen niveles de Ca y Mg suficientes para alcanzar rendimientos rentables. No obstante, en experimentos de aplicación de cal en dosis de 2.000 kg ha^{-1} realizados por INIA, se ha obtenido un incremento en rendimiento del cultivo y se ha observado una menor presencia de malezas ciperáceas (Pedreros, 2010, comunicación personal, Universidad de Concepción).

Silicio

Este elemento es tan importante como el Mg, Ca y S. La extracción de silicio (Si) que realiza la planta de arroz es superior a la de cualquier otro elemento mineral, presentando una concentración que puede fluctuar entre el 2 % y 9 % de la materia seca de la planta (Tinarelli, 1989). Se deposita principalmente en las células epidérmicas de las hojas, formando una doble capa silícea que es responsable de la resistencia a enfermedades. Estudios realizados en Japón señalan una extracción promedio de 433 kg Si ha^{-1}. En términos cuantitativos, por cada 1.000 kg de rendimiento a cosecha, la planta de arroz extrae 100 kg de Si, de los cuales gran parte se concentra en la cáscara de arroz (Atanasiu y Samy, 1985).

El Si está involucrado en todo el ciclo de crecimiento de la planta de arroz, afectando, principalmente, en la fase entre formación de panícula y maduración del grano. Este elemento promueve el desarrollo en longitud y la actividad oxidativa del sistema radical, protegiendo, además, a las plantas de la toxicidad de Fe y manganeso (Mn) producidas en condiciones anaeróbicas del suelo inundado. Por último, un buen nivel de Si en el suelo mejora la disponibilidad de P para el cultivo de arroz.

Microelementos

El Fe participa en la formación de clorofila, previene la clorosis y forma parte de actividades enzimáticas. Los excesos de Fe pueden inhibir la absorción de K (Tinarelli, 1989). El boro (B) contribuye a la absorción del N y participa en el metabolismo del Ca, estimula la actividad meristemática y la formación del polen (Tinarelli, 1989). El zinc (Zn) estimula el desarrollo inicial de las plantas, y su deficiencia puede afectar el rendimiento potencial del cultivo.

En los suelos arroceros de nuestro país, existe un buen nivel de disponibilidad de Fe y Mn, lo que incluso puede provocar competencia con otros microelementos catiónicos (Zn y Cu). Los resultados de análisis de suelo realizados por INIA, considerando el diagnóstico de microelementos, han indicado, en general, bajos niveles de B, Zn y en algunas situaciones Cu, en valores inferiores a 1 parte por millón (ppm o mg kg^{-1}). A su vez, resultados de algunos experimentos de fertilización han mostrado un efecto positivo en el rendimiento del cultivo, cuando se ha considerado la aplicación de B y Zn en la fertilización inicial realizada a la siembra (Alvarado e Hirzel, ensayos regionales de arroz 2002-2003), lo cual ha contribuido a que estos elementos se incluyan en las mezclas formuladas por las empresas de fertilizantes.

Necesidades nutricionales del cultivo

El manejo técnico desarrollado para el cultivo de arroz ha permitido mejorar los rendimientos alcanzados en este rubro agrícola. Un ejemplo de ello es la introducción de las variedades ´Diamante-INIA`, ´Brillante-INIA`, ´Ámbar-INIA`, ´Zafiro-INIA` y ´Cuarzo INIA`, que han contribuido a mejorar el rendimiento del grano y también la calidad industrial. Por lo tanto, este cultivo es dependiente de la fertilización, debido a la mayor extracción de nutrientes asociada a altos rendimientos.

Las diferencias en el material genético y condiciones edafoclimáticas hacen necesario desarrollar manejos nutricionales dirigidos a nuestras variedades locales, dado que no es replicable la experiencia extranjera en este respecto. A modo de ejemplo, en el Cuadro 1 se presenta una relación entre el rendimiento obtenido por el cultivo de arroz y la cantidad de nutrientes necesaria para alcanzar ese rendimiento (que representa el contenido de nutrientes en toda la planta), en función de la información existente en el extranjero. Como se puede observar en el Cuadro 1 y de acuerdo a la información disponible, existe una variabilidad de requerimientos nutricionales que puede llegar hasta un 30 % para el N, 50 % en el P, 60 % para el K, 30 % para el Ca, y 100 % para el Mg, lo cual estará en función del material genético empleado y de la condición edafoclimática del cultivo.

Cuadro 1. Necesidades nutricionales del cultivo de arroz (grano + tallo + hojas) según nivel de rendimiento.

Nutrientes considerados	Necesidades nutricionales (kg de nutriente) para 5 niveles de rendimiento de grano				
	3,0 t	4,5 t	6,0 t	7,5 t	9,0 t
Nitrógeno (N)	48 – 64	72 – 96	96 – 128	120 – 160	144 – 193
Fósforo (P)	9 – 13	13 – 20	18 – 26	22 – 33	26 – 40
Potasio (K)	55 – 88	83 – 133	110 – 176	138 – 220	156 – 256
Calcio (Ca)	17 - 22	25 – 34	34 - 45	42 – 56	50 – 68
Magnesio (Mg)	6 - 12	9 – 17	12 - 23	15 - 29	26 – 35
Azufre (S)	5,3	7,9	10,6	13,3	16

Fuente: Atanasiu y Samy (1985), Cordero-Vásquez y Murillo-Vargas (1990).

A nivel nacional existe escasa información de las necesidades nutricionales de esta especie, que a la vez incluya las variedades comerciales de mayor uso. No obstante, en la Figura 1 se presentan las necesidades nutricionales de la variedad ´Diamante-INIA` para un nivel de alto rendimiento, lo cual sirve de orientación general para conocer las necesidades de este cultivo.

Considerando los antecedentes de la Figura 1 para obtener un rendimiento aceptable (superior a 6 t ha^{-1}), la planta de arroz necesita absorber importantes cantidades de algunos nutrientes (N y K, principalmente), los cuales son parcialmente repuestos por la fertilización. En términos productivos, las necesidades nutricionales corresponden a 1,2 kg de N; 0,84 kg de P_2O_5; 2,2 kg de K_2O; 0,62 kg de CaO; y 0,56 kg de MgO por cada 100 kg de rendimiento. Como información adicional y también de manera orientativa, las necesidades de micronutrientes para esta variedad corresponden a 640 g de Fe; 188 g de Mn; 5,6 g de Zn; 1,2 g de B; y 1,5 g de Cu por cada 100 kg de rendimiento.

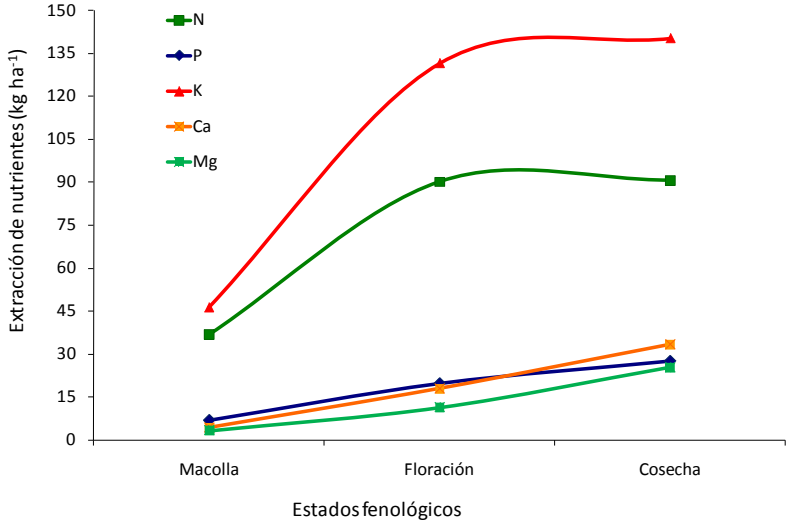


Figura 1. Evolución de la extracción de nutrientes en el cultivo de arroz variedad ´Diamante-INIA`, para un rendimiento de 7,5 t ha^{-1}. Ensayos regionales INIA, Parral, Región del Maule, temporada 2002-2003.

Si bien las necesidades nutricionales del cultivo de arroz son altas para algunos nutrientes como el K, generalmente desde el campo sólo se extrae el grano cosechado, dejando el residuo en pie para su incorporación o quema en la próxima preparación de suelo. Por su parte, la incorporación de residuos permite reponer parte del K, Ca, S, y de los microelementos; sin embargo, cuando se realizan labores de quema de residuos previo al siguiente cultivo, se produce una pérdida del N y S contenido en los residuos, a través del proceso de volatilización hacia la atmósfera.

En la Figura 2 se presenta la distribución de nutrientes en la planta de arroz, considerando el grano y el residuo, lo cual permite estimar los aportes nutricionales generados con la incorporación de residuos y, a su vez, fundamenta la importancia de realizar esta labor. Como se observa, la incorporación de residuos de arroz al suelo permite retornar parte del K, Ca y Mg extraído por el cultivo de arroz anterior, lo cual reduce notablemente las necesidades nutricionales del cultivo siguiente.

Reservas nutricionales en el suelo

El análisis de suelo es una herramienta de diagnóstico fundamental para el manejo del cultivo de arroz, ya que permite evaluar la condición de fertilidad de cada suelo y, así, determinar de manera

más adecuada las dosis de cada uno de los nutrientes involucrados en la fertilización de este cultivo. Si bien el análisis de suelo entrega un índice de disponibilidad de nutrientes, y de algunas variables que se relacionan con la fertilidad natural del suelo (materia orgánica), existe una relación directa con el resultado en rendimiento que se obtiene en el cultivo.

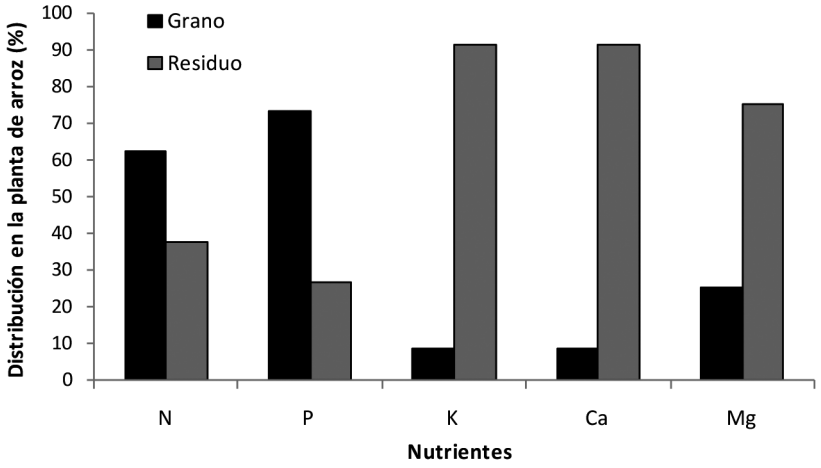


Figura 2. Distribución de nutrientes en la planta de arroz (grano y residuo aéreo). Adaptado de Cordero-Vásquez y Murillo-Vargas (1990).

Los niveles de nutrientes encontrados en suelos arroceros, de un universo de 54 muestras colectadas al azar, para los principales parámetros y elementos considerados en el análisis de fertilidad, se presentan en las Figuras 3, 4, 5, 6, y 7, para la determinación de pH, contenido de materia orgánica y niveles de N, P y K, respectivamente (Laboratorio de Suelos de INIA, 2003). Como se puede apreciar en las Figuras 3 a 7, la mayoría de las muestras consideradas tienen un pH entre 5,5 y 6,4 (leve a moderadamente ácido); los contenidos de materia orgánica fluctúan entre 1,6 y 3,5 %; el P disponible es inferior a 10 mg kg^{-1}; y los niveles de K son inferiores a 100 mg kg^{-1}. Por su parte, el contenido de N mineralizable es muy variable, lo cual obedece a las fracciones o grupos activos y de reserva de este elemento en el suelo (Duxbury et al., 1991; Angus et al., 1994; Scott et al., 2005; Wienhold, 2007; Khorsandy y Nourbakhsh, 2008), como también a la génesis del suelo (Bushong et al., 2007; Hirzel et al., 2012; Hirzel y Stolpe, 2015), sin existir aún valores referenciales acotados para este parámetro, por lo cual las recomendaciones de dosis de N pueden ser mejoradas.

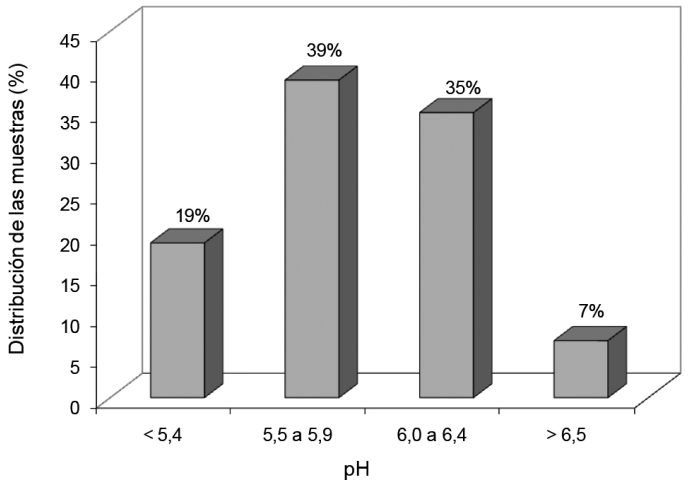


Figura 3. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de pH, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

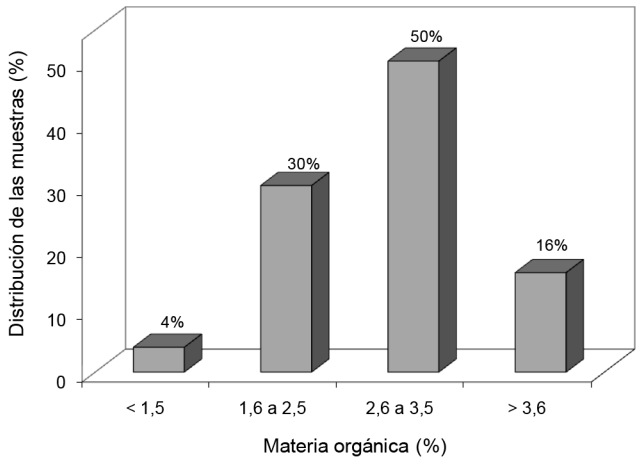


Figura 4. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de materia orgánica, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

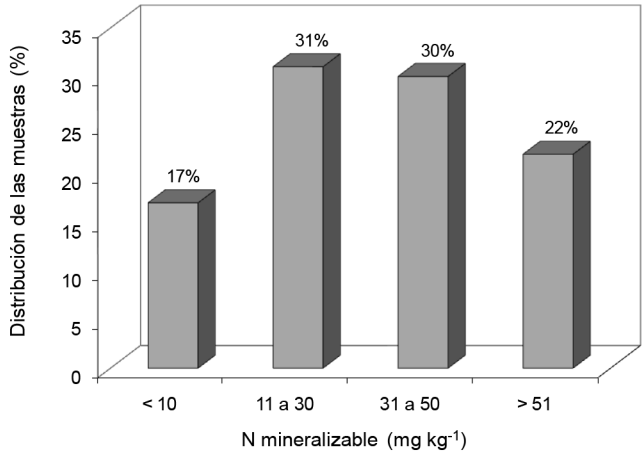


Figura 5. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de concentración de nitrógeno mineralizable, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

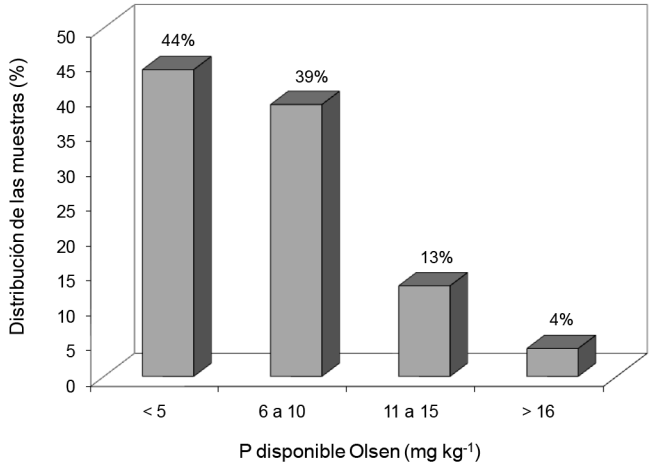


Figura 6. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de concentración de fósforo disponible (Olsen), para suelos provenientes de las Regiones del Maule y Ñuble (ex Biobío), Chile.

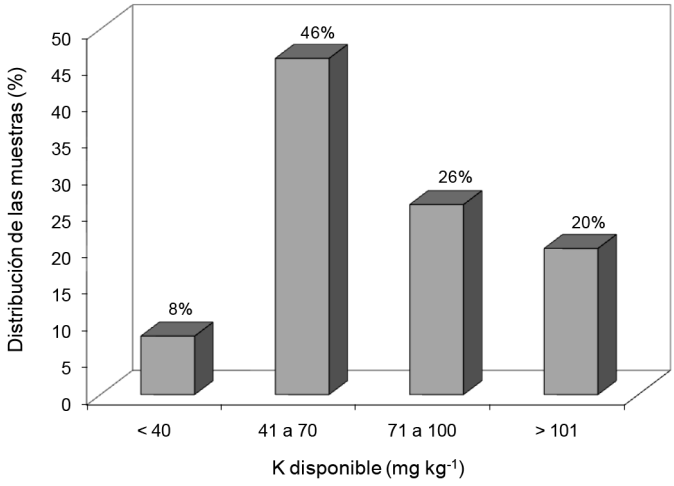


Figura 7. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de concentración de potasio disponible, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

Respecto de la metodología de determinación de la capacidad de aporte de N del suelo y su relación con las necesidades de N por el cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente, estudios realizados en Chile indican que el método de incubación anaeróbica sin agitación, permite lograr un mejor ajuste entre la dosis de N a emplear en cultivos de campo (Hirzel y Rodríguez, 2013; Hirzel y Stolpe, 2015; Hirzel et al., 2015). Para siembras del cultivo en seco y posterior inundación, no hay estudios de ajuste de métodos que permitan estimar la capacidad de aporte de N desde el suelo y la necesidad real del cultivo en campo.

El análisis de otros elementos como Ca, Mg, S, B, Cu y Zn, no es considerado en el análisis de rutina para fertilidad de suelos, cuyos niveles de disponibilidad en suelos arroceros fueron discutidos anteriormente.

Otro elemento de suma importancia en el cultivo de arroz es el Si -como fue señalado previamente-, el cual no está considerado en los programas de fertilización usados en Chile, debido a que el material original de nuestros suelos arroceros y el agua de riego contienen suficientes cantidades de Si. No obstante, es necesario evaluar efecto de aplicaciones foliares de Silicio, lo cual ha tenido efectos positivos en otras especies como arándanos y cerezos.

Resultados experimentales en el manejo de fertilización del cultivo

Una de las principales herramientas de manejo de la fertilización, junto con el análisis de suelo, es la realización de prácticas de manejo adecuadas en la preparación del mismo, las cuales permiten mejorar la disponibilidad y eficiencia de uso de los nutrientes en el cultivo, principalmente del N, lo cual puede verse reflejado en un mayor rendimiento (Bouldin, 1986). Al respecto, Kundu et al. (1996) señalaron que al aumentar la profundidad de preparación de suelos (arado cincel), se produjo un aumento en el aporte de N que fluctuó entre 4 y 10 kg ha^{-1}. Este aumento en la profundidad de preparación de suelos potencia el crecimiento radical del cultivo y también su productividad, generando un beneficio en la segunda temporada de cultivo consecutivo, aunque en menor medida.

El manejo de la fertilización en el cultivo del arroz obedece a las necesidades nutricionales ya señaladas, y a las propiedades químicas del suelo. Si bien la capacidad de aporte nutricional

desde el suelo está directamente relacionada con sus reservas, la dinámica de algunos nutrientes, como el N y P en condiciones inundadas, presenta algunas diferencias respecto a las condiciones sin inundación, las cuales normalmente generan una mayor disponibilidad de estos nutrientes. Por ejemplo, para el N las condiciones anaeróbicas generadas bajo inundación favorecen una actividad microbiana con bajos requerimientos de este nutriente, lo cual se traduce en una mayor disponibilidad de N al cultivo (Atanasiu y Samy, 1985). En contraste a lo anterior, para siembras en seco el aporte natural de N desde el suelo es menor; por tanto, para lograr el rendimiento potencial en una determinada condición agroclimática se requiere de una mayor dosis de N.

El análisis de las propiedades químicas del suelo para el cultivo de arroz es el mismo que se realiza para suelos no inundados, excepto para determinar la disponibilidad de N, para lo cual se debe realizar un análisis de mineralización de este nutriente en condiciones parcialmente anaeróbicas (incubación de suelos en condiciones controladas de temperatura y humedad) por un período determinado. Como ya se señaló, este análisis ha sido correlacionado positivamente con el rendimiento por muchos autores (Angus et al., 1994; Wilson et al., 1994; Bushong et al., 2007; Soon et al., 2007; Rodríguez et al., 2008; Hirzel y Rodríguez, 2013; Hirzel et al., 2015).

Aplicaciones de nitrógeno

Este método determina la cantidad de N (amonio, principalmente, dado que la concentración de nitrato en condiciones inundadas controladas presenta poca variación) que es potencialmente mineralizable o que estará disponible en el suelo bajo condiciones inundadas, cuando todos los factores que afectan la disponibilidad de este nutriente, se encuentran dentro de su rango óptimo. Si bien la cantidad de N que se encontrará disponible en condiciones de campo (particularmente para el cultivo de arroz), será inferior a lo obtenido en condiciones de laboratorio, este análisis permite categorizar suelos en función de su nivel de respuesta a la aplicación de N, que representa la mayor o menor necesidad de aplicar este nutriente al cultivo de arroz. Al respecto, Rojas-Walker (2008) observó una estrecha asociación entre los rendimientos relativos de arroz y los contenidos de $N\text{-}NH_4$ parcialmente mineralizado en 20 sitios experimentales, distribuidos en el área arrocera de Talca a Ñuble ($R = 0{,}93$). Por ejemplo, en la Figura 8 se presenta el N amoniacal mineralizado en dos suelos cultivados con arroz, cuando han sido sometidos a condiciones controladas de humedad y temperatura. Los suelos evaluados corresponden a diferentes clases taxonómicas, asociadas a la edad y evolución de cada uno de ellos. De esta forma, el suelo de menor desarrollo o más nuevo (Inceptisol de la zona de San Carlos, serie Quilmen) presenta una menor estabilidad en las fracciones de N de reserva, generando una mayor entrega potencial de N disponible al cultivo de arroz. De manera contraria, el suelo de mayor desarrollo o más evolucionado (Vertisol de la zona de Parral, serie Quella) presenta una mayor estabilidad en las fracciones de N de reserva y, por tanto, una menor capacidad potencial de entrega de este nutriente hacia el cultivo. Resultados similares fueron obtenidos también por Rodríguez y Rojas (1977) en un estudio para evaluar el efecto del número de años de cultivo de arroz sobre la disponibilidad del elemento, tanto en un suelo de la serie Quella como San Carlos.

Para complementar la información entregada, en la Figura 9 se presenta la respuesta en rendimiento de grano del cultivo de arroz, permanentemente inundado, frente a la aplicación de dosis crecientes de N. En esta figura se puede apreciar que la mayor respuesta al N aplicado (ganancia de rendimiento de grano frente a la adición de N), se presenta en el suelo Vertisol (serie Quella) (5,4 y 6,7 t de incremento para las dosis de 80 y 160 kg N ha^{-1}, respectivamente, en relación al control sin aplicación de N) que a su vez presentó la menor concentración de N mineralizado (Figura 8). En tanto, en el suelo Inceptisol la respuesta a las dosis de N se mani-

festó en un incremento de 2,2 y 4,4 t para las dosis de 80 y 160 kg N ha^{-1}, respectivamente. Si bien hay diferencias en la potencialidad de rendimiento de ambos suelos por sus características físico-químicas y sus condiciones climáticas, la menor respuesta obtenida en el suelo Inceptisol está asociada a la mayor concentración de N amoniacal, obtenida al incubar este suelo en condiciones anaeróbicas (Figura 8). Lo anterior corrobora el planteamiento que indica que la dosificación de N en el cultivo de arroz se debe relacionar con el potencial de rendimiento de este cultivo y la mineralización de N del suelo, determinada con la incubación en condiciones parcialmente anaeróbicas (método de N incubado para suelos arroceros).

El uso de dosis de N mayores a las necesidades del cultivo puede generar desórdenes en el desarrollo fenológico, aumentando el período vegetativo y produciéndose el inicio del período reproductivo en forma más tardía, lo que puede aumentar la esterilidad floral debido a las bajas temperaturas que se pueden producir en ese período, dado que en la fase final del cultivo las temperaturas ambientales comienzan a disminuir, afectando negativamente la madurez de los granos y el rendimiento comercial. Al respecto, es común encontrar situaciones productivas en las cuales no se ha conseguido una adecuada madurez del grano, asociado a un uso incorrecto en la dosis de N (dosis mayores a lo necesario para la situación edafoclimática particular).

Por otra parte, cuando se reduce el tiempo de desarrollo del cultivo, también disminuye el potencial de rendimiento y, con ello, las necesidades de N. En consecuencia, siembras tardías del arroz deben ir asociadas a una reducción en la dosis de N a emplear, dado que el cultivo tendrá un menor período de desarrollo antes que comiencen a descender las temperaturas ambientales. Esta misma situación se puede producir en un año frío, como el ocurrido en 2009-2010, donde las mayores aplicaciones de N tuvieron un efecto negativo sobre el rendimiento. Por ello, es importante enfatizar la necesidad de realizar análisis de suelo, con especial interés en el N mineralizable para suelos arroceros, para optimizar la dosis de N a emplear y, a la vez, evitar errores productivos asociados a una mala dosificación de este nutriente.

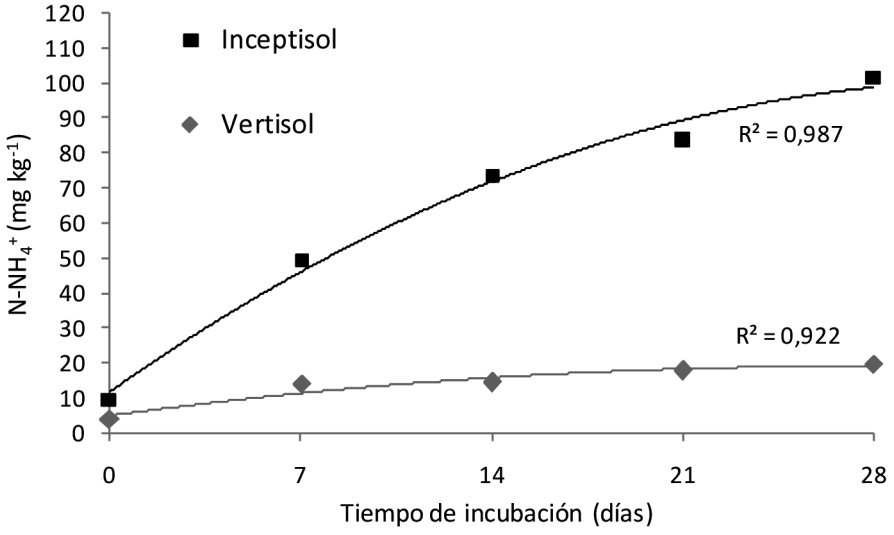


Figura 8. Nitrógeno amoniacal mineralizado en condiciones anaeróbicas en dos suelos arroceros de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

El suelo Inceptisol corresponde a la serie Quilmén en San Carlos y el suelo Vertisol corresponde a la serie Quella en Parral.

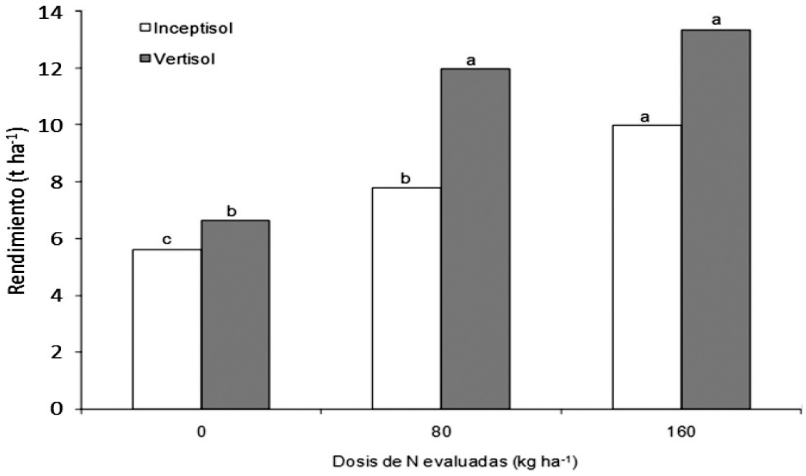


Figura 9. Efecto de diferentes dosis de nitrógeno en el rendimiento de grano de la variedad ´Diamante-INIA` en dos suelos arroceros de las Regiones del Maule y Ñuble (ex Biobío), Chile. Letras distintas sobre las barras para un mismo tipo de suelo indican diferencia estadística según test de Tukey ($p < 0,05$).

A juicio de muchos autores, en el cultivo de arroz, el N es el principal nutriente asociado con el rendimiento (Rojas y Alvarado, 1982; Angus et al., 1994; Wilson et al., 1994; Sahrawat, 2006; Bouman et al., 2007; Lin et al., 2007; Jing et al., 2008), al igual que para la mayoría de las especies de interés agronómico.

Para optimizar la aplicación de fertilizantes nitrogenados en un cultivo, es necesario conocer la capacidad de mineralización desde el suelo (Angus et al., 1994), dado que la absorción de N proviene, principalmente, desde las reservas (mineralización de materia orgánica, ciclos dinámicos de la biomasa microbiana, y $N\text{-}NH_4^+$ fijado en las arcillas) (Jokela y Randall, 1997; Jensen et al., 2000; Sainz et al., 2004; Sahrawat, 2006) y de la fertilización nitrogenada (Wienhold, 2007), y sólo una pequeña fracción deriva del agua de riego y otras fuentes ambientales y bióticas.

La cantidad de N suministrada desde el suelo y su absorción por la planta durante diferentes ciclos de cultivos son altamente dinámicas y difíciles de estimar, y además representan sólo una pequeña fracción del N total en el suelo (Scott et al., 2005; Wienhold, 2007). En el caso del cultivo de arroz, la respuesta a la aplicación de N es también variable y responde a factores genéticos (diferentes cultivares), factores de suelo (propiedades físicas y químicas), clima (temperatura durante todo el ciclo de cultivo) y manejo (láminas de agua, dosis y parcialización del N), como ha sido presentado por diferentes autores (Atanasiu y Samy, 1985; Hirzel et al., 2012; Hirzel y Rodríguez, 2013; Myers, 2004; Jing, 2007; Rojas-Walker, 2008).

Estudios recientes en Chile indican que el cultivo de arroz en condiciones inundadas responde a dosis de N que varían entre 100 y 200 kg ha^{-1}, aplicadas previo a la siembra (Artacho et al., 2009); sin embargo, para un uso eficiente del N, éste debe ser parcializado (Rojas-Walker, 2008). Al respecto, estudios realizados por el INIA en suelos arroceros de las Regiones del Maule y de Ñuble, indican que el cultivo de arroz en condiciones permanentemente inundadas, responde a dosis de N de entre 80 y 160 kg ha^{-1} (aplicado en tres parcialidades: siembra, inicio de macolla e inicio de panícula), en tanto que para siembras en seco se logra una respuesta al N con dosis mayores.

En general, la respuesta a la aplicación de N está relacionada a las variaciones climáticas de cada temporada (temperaturas adecuadas hacen más eficiente el uso del N) y a la condición edafoclimática de cada zona, como se puede observar en las Figuras 10 a 13. Rojas-Walker (2010, datos no publicados) ha observado altas correlaciones entre los rendimientos promedios del cultivo de

arroz y la suma de la evapotranspiración potencial ocurrida 20 d antes y 20 d después de la época de floración. Este parámetro, probablemente también se relaciona con los grados días ocurridos en la temporada.

Los resultados experimentales obtenidos para siembras de arroz en condiciones permanentemente inundadas indican, a su vez, que el rendimiento se maximiza con dosis de N entre 150 y 160 kg ha^{-1} según la temporada y localidad, con dosis del orden de 1,5 a 1,8 kg N por 100 kg. Sin embargo, la dosis de N que permite optimizar la inversión en fertilizante nitrogenado (mayor relación beneficio/costo) es siempre inferior a la señalada como adecuada para obtener el rendimiento máximo, y estará asociada al precio del quintal de arroz y al precio del fertilizante nitrogenado (urea), y normalmente corresponde a dosis entre 1,2 y 1,6 kg N 100 kg a obtener, según el resultado del análisis de suelo.

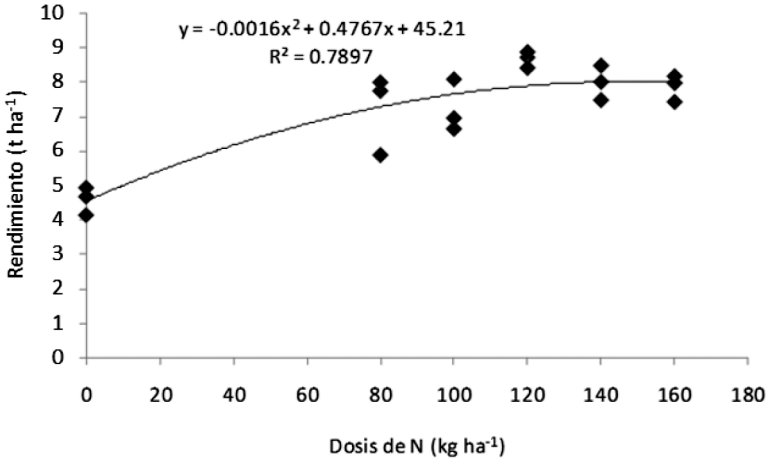


Figura 10. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente. Parral, Región del Maule, temporada 2007-2008.

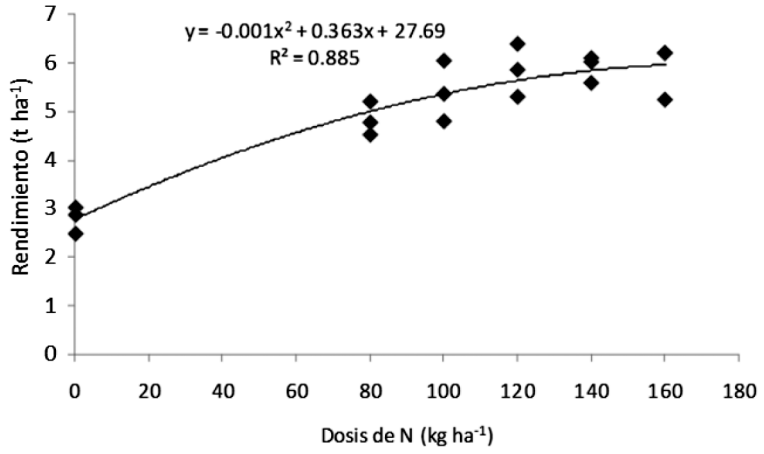


Figura 11. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente. Parral, Región del Maule, temporada 2008-2009.

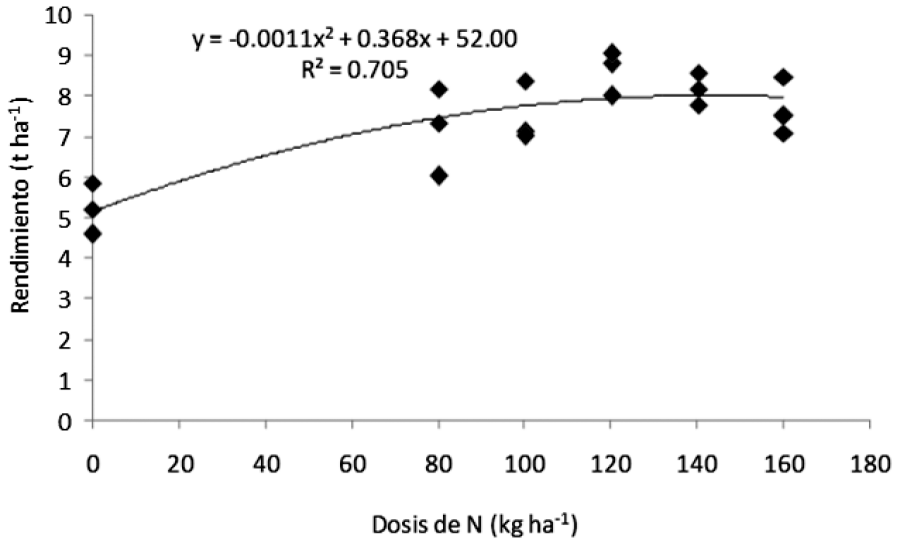


Figura 12. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA`, en condiciones de inundación permanente. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2007-2008.

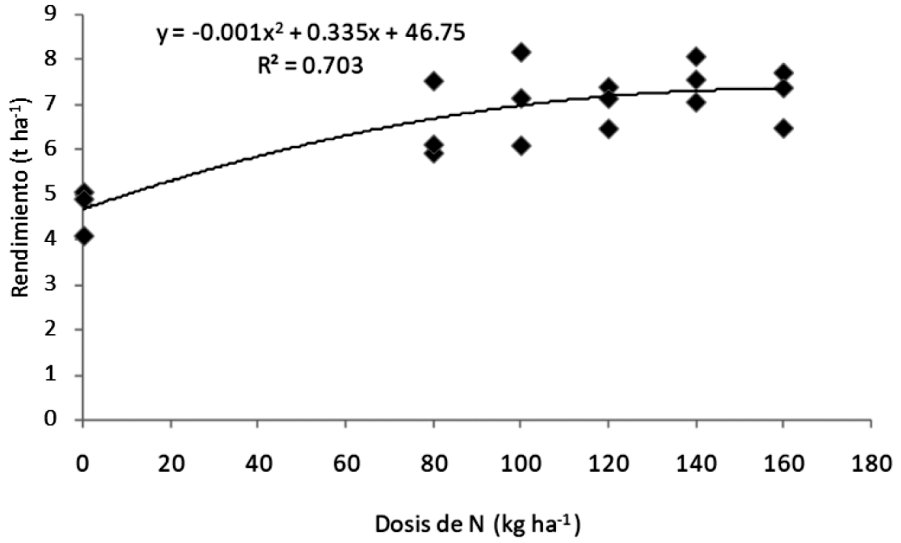


Figura 13. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2008-2009.

En términos de parcialización del N, dada la dinámica de este nutriente en el suelo (transformaciones biológicas y químicas que afectan la recuperación de este nutriente por la planta y los procesos de pérdida), los estudios antes señalados indican que el mayor rendimiento se ha logrado con dos y tres parcialidades; aplicaciones a la siembra e inicio de panícula; o a la siembra, macolla e inicio de panícula, como se puede observar en las Figuras 14 a 17. Esta estrategia de fertilización concuerda con las recomendaciones del RiceCheck de Australia, que sugieren un fraccionamiento

del N equivalente a un 67 % de pre-inundación y a un 33 % en la etapa de inicio de panícula, y nunca más de 60 kg N ha^{-1} al inicio de panícula (Ricecheck, 2006). Rojas (2010, comunicación personal, Instituto de Investigaciones Agropecuarias) indica que los mayores rendimientos logrados en la variedad ´Diamante-INIA` corresponden a la aplicación de un 50 % del N en pre-inundación, 25 % al inicio de macolla y 25 % al inicio de panícula. La predicción de la dosis basal de pre-inundación puede inferirse del análisis de amonio parcialmente mineralizable del suelo y el fraccionamiento a macolla e inicio de panícula, con el apoyo del análisis foliar y una herramienta práctica sugerida inicialmente por Dobermann y Fairhurst (2000) y Mutters (2000), Universidad de California. Al respecto, en estudios efectuados con la variedad ´Diamante-INIA`, Rojas-Walker (2008) detectó que los valores críticos para N total de la hoja bandera e índices de transmisión como índices de clorofila, corresponden a 3,1 % y 33,5 %, respectivamente.

El número de parcializaciones (dos o tres) será determinado por el productor, en función de la oportunidad de siembra y las labores a realizar durante el cultivo, además de la predicción de temperaturas que puedan ocurrir durante la floración y llenado del grano. De esta forma, para siembras oportunas y superficies de cultivo manejables, lo adecuado será realizar tres parcializaciones de N (siembra, macolla e inicio de panícula), en tanto para siembras un poco tardías o en superficies muy amplias de cultivo, se puede perder oportunidad en la realización de labores y, por tanto, resultará conveniente realizar dos parcializaciones (siembra e inicio de panícula). El ajuste de la dosis de N podrá apoyarse en herramientas tecnológicas tales como el análisis foliar y la lectura del índice de clorofila, con el apoyo de equipos como el medidor de clorofila SPAD-502 (Rojas-Walker, 2008).

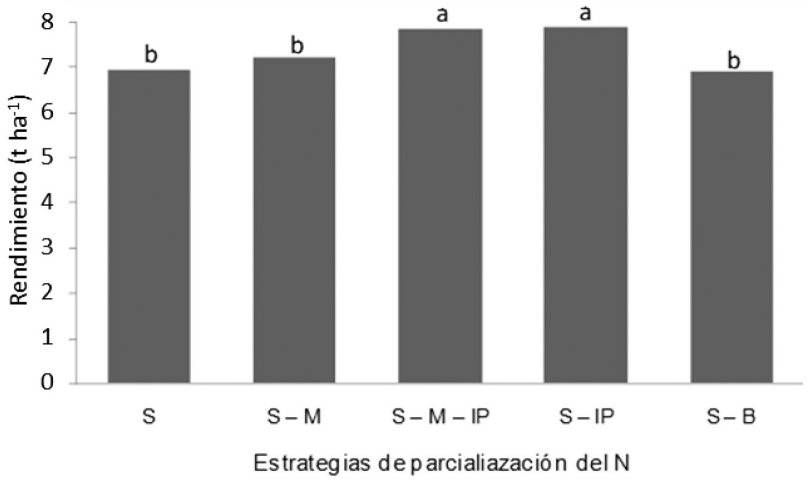


Figura 14. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha^{-1}. Parral, Región del Maule, temporada 2007-2008. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S – M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S – M – IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S – IP = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S – B = N aplicado 50% a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

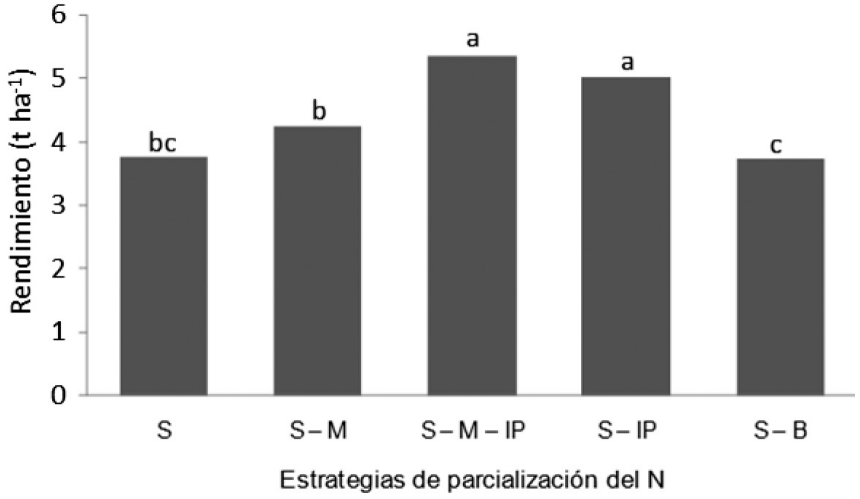


Figura 15. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA`, en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha^{-1}. Parral, Región del Maule, temporada 2008-2009. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S – M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S – M – IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S – IP = N aplicado 50% a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S – B = N aplicado 50% a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

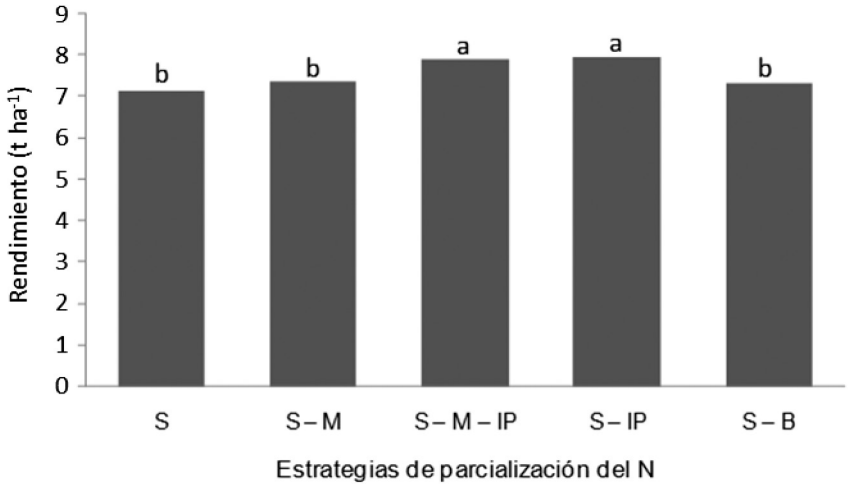


Figura 16. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha^{-1}. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2007-2008. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S – M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S – M – IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S – IP = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S – B = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

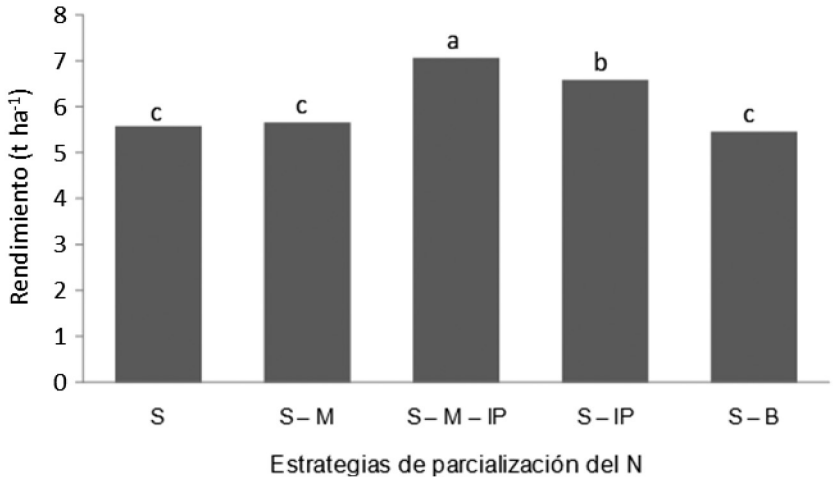


Figura 17. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha^{-1}. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2008-2009. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S – M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S – M – IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S – IP = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S – B = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

Aplicaciones de P y K

Otros nutrientes importantes para el cultivo del arroz corresponden al fósforo (P) y potasio (K), cuyo efecto fue evaluado por Ortega (1989), quien indicó respuesta en rendimiento del cultivo hasta dosis de 60 kg P_2O_5 ha^{-1} y una respuesta incierta en el caso del K aplicado, en función de la concentración de este nutriente en el suelo. Dosis de P mayores a 60 kg P_2O_5 ha^{-1} no generaron incrementos de rendimiento en el cultivo de arroz. Para el caso de siembra en seco, estudios recientes realizados por INIA indican que la respuesta a la aplicación de P y K se maximiza con dosis de 30 kg de P_2O_5 y con una baja respuesta a la aplicación de K, como se presenta en otro de los capítulos de este libro.

Desde un punto de vista de la sustentabilidad, al trabajar con incorporación de residuos en el cultivo de arroz, el uso de dosis de P mayores a 45 kg P_2O_5 ha^{-1}, permite generar un incremento en la reser-

va de P del suelo, para rendimientos inferiores a 7,5 t ha^{-1}, considerando una extracción neta (sólo la extracción del grano) de 0,6 kg P_2O_5 100 kg^{-1} de arroz producido (Figuras 1 y 2). Del mismo modo, la incorporación de residuos genera una importante recuperación del K previamente extraído, por lo cual el uso de dosis mayores a 20 kg K_2O ha^{-1} permite generar un incremento en la reserva de este nutriente en el suelo para rendimientos inferiores a 7,5 t ha^{-1}, considerando una extracción neta de 0,26 kg K_2O 100 kg^{-1} de arroz producido (Figuras 1 y 2). Un efecto similar al aporte de P y K se genera con la quema de residuos en pie, dado que estos nutrientes forman parte de las cenizas depositadas en el suelo.

En aquellas situaciones en las cuales no se realice incorporación del P y K contenido en los residuos, ya sea por incorporación directa de los residuos o a través de prácticas de quema del residuo en pie, la extracción de P y K puede superar los 63 y 165 kg ha^{-1} de P_2O_5 y K_2O, respectivamente, para un rendimiento indicativo de 7,5 t (Figura 1). Por ello, el uso de dosis inferiores a estas extracciones genera una reducción en las reservas de estos nutrientes en el suelo para las condiciones de rendimiento señaladas. Al respecto, estudios realizados por INIA indican que la concentración de P en los suelos arroceros se ha incrementado levemente durante los últimos 20 años, en tanto que la concentración de K y también el contenido de materia orgánica se han reducido.

Otros parámetros químicos de los suelos arroceros que tienen mucha importancia en el rendimiento son pH (grado de acidez o alcalinidad del suelo y también medida indirecta de la reserva nutricional de algunos nutrientes) y las concentraciones de B y Zn. Al respecto, estudios demostrativos realizados por INIA indican efectos positivos en el rendimiento de grano frente a la aplicación de carbonato de calcio, B y Zn al suelo, como se puede observar en las Figuras 18, 19, y 20, respectivamente, para siembras en condición de inundación permanente. Para condiciones de siembra en seco y aplicaciones de encalado en presiembra o de aplicaciones foliares de Zn y B, no hubo respuesta al encalado y algunas respuestas a la aplicación foliar de los micronutrientes Zn y B (Figuras 21 y 22).

No obstante, aunque es necesario contar con un mayor número de estudios, en las dosis a emplear para estos nutrientes, como también para el encalado, se debe considerar la determinación de estos parámetros químicos (B, Zn y pH) en el análisis de suelo y, posteriormente, determinar la necesidad y dosis de aplicación. Adicionalmente, estos estudios indicaron que la aplicación de carbonato de calcio en los suelos arroceros incrementó la disponibilidad de P, B y Zn una vez concluido el período de cultivo.

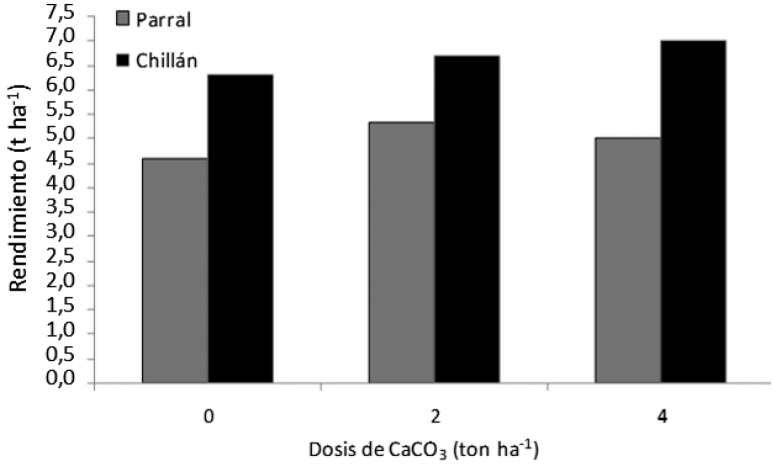


Figura 18. Efecto de la aplicación de carbonato de calcio sobre el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente, fertilizado con 100 kg N, 60 kg P_2O_5 y 60 kg K_2O. Localidades de Parral, Región del Maule, y Chillán, Región de Ñuble, temporada 2002-2003.

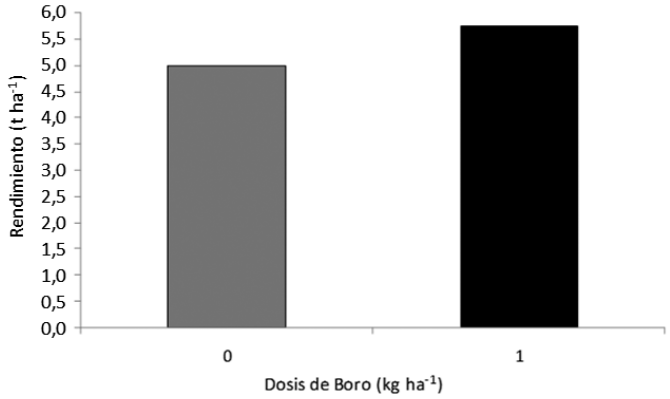


Figura 19. Efecto de la aplicación de boro sobre el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente, fertilizado con 100 kg N, 60 kg P_2O_5 y 60 kg K_2O. Parral, Región del Maule, temporada 2002-2003.

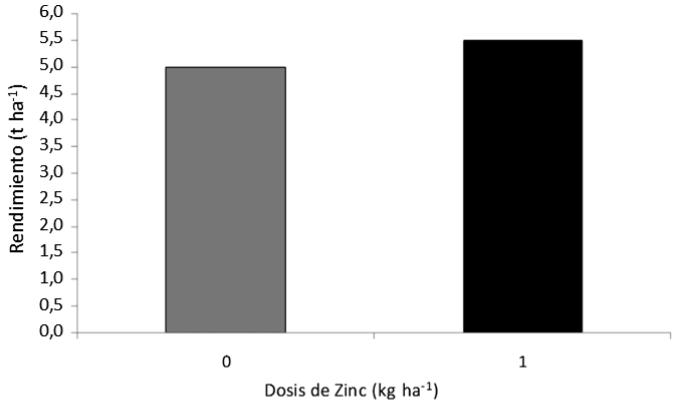


Figura 20. Efecto de la aplicación de zinc sobre el rendimiento de grano de arroz variedad ´Diamante-INIA` en condiciones de inundación permanente, fertilizado con 100 kg N, 60 kg P_2O_5 y 60 kg K_2O. Parral, Región del Maule, temporada 2002-2003.

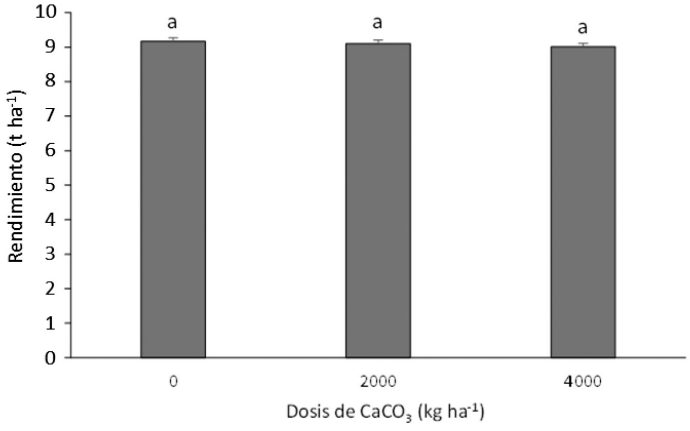


Figura 21. Efecto de dosis crecientes de carbonato de calcio ($CaCO_3$) aplicado en presiembra, sobre el rendimiento de la variedad ´Digua Cl` en condiciones de siembra en seco, como promedio de dos temporadas (2016-2017 y 2017-2018) y dos localidades (Parral y San Carlos). n = 180. Letras distintas sobre las columnas indican diferencia significativa según test de Tukey ($p<0.05$). Las barras sobre las columnas indican el error estándar de la media.

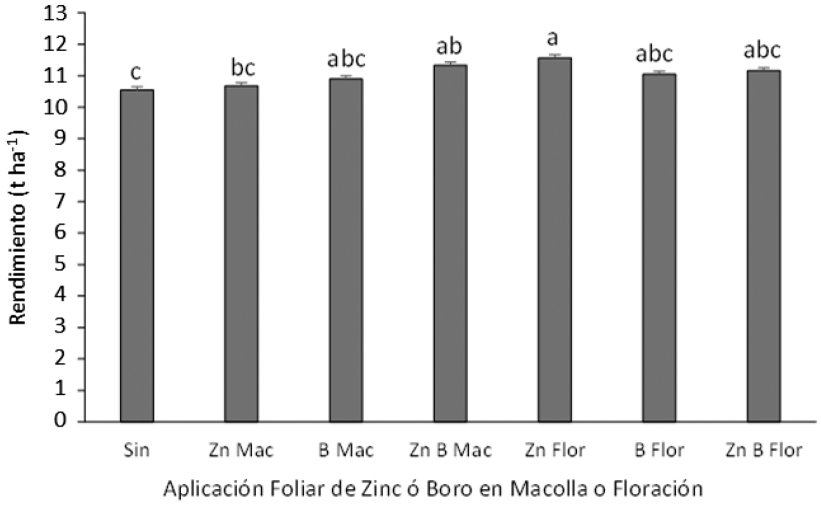


Figura 22. Efecto de aplicaciones foliares individuales o combinadas de Zinc (Zn) y Boro (B) en estados de macolla (Mac) o floración (Flor), sobre el rendimiento de la variedad ´Digua CI`, en condiciones de siembra en seco, como promedio de dos temporadas (2016-2017 y 2017-2018) y dos localidades (Parral y San Carlos). n = 84. Letras distintas sobre las columnas indican diferencia significativa según test de Tukey ($p<0.05$). Las barras sobre las columnas indican el error estándar de la media.

Guía de fertilización del cultivo de arroz

Como una forma de entregar antecedentes que sirvan de guía general para la fertilización del cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente y para diferentes niveles de rendimiento, desde los Cuadros 2 y 3 se presenta información con los nutrientes a aplicar, el parámetro de fertilidad de suelos usado como indicador para determinar la dosis de nutriente, y diferentes rangos de valores para estos parámetros, con lo cual se sugieren dosis referenciales de cada nutriente. Los criterios para determinar las dosis referenciales están basados en antecedentes experimentales, además de la experiencia científica y empírica de los autores. Dicha visión comprende la gestión de la fertilización del cultivo para variadas condiciones de suelo de nuestro país, la opinión de colaboradores técnicos, factores económicos, y también un criterio de sustentabilidad de los recursos edáficos que permita mantener o incrementar la fertilidad y capacidad productiva de los suelos.

Para aquellas situaciones en las cuales se debe aplicar una enmienda calcárea como medida correctiva de la acidez del suelo, es necesario considerar que las dosis señaladas serán altas en relación a los otros nutrientes, y que su principal fuente de aplicación es el carbonato de calcio ($CaCO_3$).

Las recomendaciones de fertilización sugeridas para los restantes nutrientes de los Cuadros 2 y 3, se han definido en base a los rangos de fertilización utilizados por el Sistema de Recomendación de Fertilización para el cultivo de arroz que utiliza en forma rutinaria el Laboratorio Central de Análisis de Suelos de INIA, en Chillán.

Cuadro 2. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial alto (7,1 a 10,0 t ha^{-1}).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha^{-1})
N*	N mineralizable (mg kg^{-1})	< 20	110 – 120
		21 – 40	90 – 100
		> 41	70 – 85
P_2O_5**	P Olsen (mg kg^{-1})	< 5	70 – 80
		6 – 12	55 – 60
		> 12	40 – 45
K_2O**	K intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,3	70 – 80
		0,3 – 0,5	55 – 60
		> 0,5	40 – 50
$CaCO_3$***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,8	15 – 20
		0,8 – 1,2	10 – 15
		> 1,2	0 – 10
S	S disponible (mg kg^{-1})	< 8	15 – 20
		8 – 12	10 – 15
		> 12	0 – 10
B	B disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5
Zn	Zn disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos, se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P, y entre 30 % y 40 % de la dosis sugerida para K.

***La dosis de $CaCO_3$ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a Cal comercial de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando $CaCO_3$*$MgCO_3$ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Cuadro 3. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial medio (5,0 a 7,0 t ha^{-1}).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha^{-1})
N*	N mineralizable (mg kg^{-1})	< 20	85 – 95
		21 – 40	70 – 80
		> 41	55 – 65
P_2O_5**	P Olsen (mg kg^{-1})	< 5	60 – 65
		6 – 12	45 – 55
		> 12	30 – 40
K_2O**	K intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,3	45 – 60
		0,3 – 0,5	35 – 40
		> 0,5	0 – 30
$CaCO_3$***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,8	12 – 15
		0,8 – 1,2	8 – 12
		> 1,2	0 – 8
S	S disponible (mg kg^{-1})	< 8	12 – 15
		8 – 12	8 – 12
		> 12	0 – 8
B	B disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4
Zn	Zn disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos, se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P y entre 30 % y 40% de la dosis sugerida para K.

***La dosis de $CaCO_3$ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a Cal comercial de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando $CaCO_3$*$MgCO_3$ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por lo tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Referencias

Alvarado, R., Madariaga, R., Gómez, A. 1991. Pudrición del tallo en arroz: Respuesta varietal. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile) 50:32-35.

Angus, J.F., Ohnishi, M., Horie, T., et al. 1994. A preliminary study to predict net nitrogen mineralization in a flooded rice soil using anaerobic incubation. Aust. J. Exp. Agric. 34:995-999.

Artacho, P., Bonomelli, C., Meza, F. 2009. Nitrogen application in irrigated rice growth in Mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency. J. Plant Nutr. 32(9):1574-1593.

Atanasiu, N., Samy, J. 1985. Nutrición de la planta: fertilizantes y abonos orgánicos para el arroz. En: Arroz uso eficaz de los fertilizantes. Conzett + Huber AG., Zúrich, Suiza.

Bouldin, D.R. 1986. The chemistry and biology of flooded soils in relation to the nitrogen economy in rice fields. Fert. Res. 9:1-14.

Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P., et al. 2007. Rice and water. Adv. Agron. 92:187-237.

Bushong, J.T., Norman, R.J., Ross, W.J., et al. 2007. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 38:2799-2813.

Cordero-Vásquez, A., Murillo-Vargas, J. 1990. Removal of nutrients by rice cultivar CR 1821 under flood irrigation. Agron. Costarricense 14(1):79-83.

Dobermann, A., Fairhurst, T. 2000. Rice: Nutrient disorders and nutrient management. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC), and International Rice Research Institute (IRRI). Oxford Graphic Printers Pte Ltd., Singapore.

Duxbury, J.M., Lauren, J.G., Fruci, J.R. 1991. Measurement of the biologically active soil nitrogen fraction by a ^{15}N technique. Agric. Ecosyst. Environ. 34:121-129.

Grist, D.H. 1975. Rice. 5th ed. Longman, London, UK.

Hirzel, J., Cordero, K. Fernández, F., 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. 35:396-412.

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.

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.

Hirzel, J., Stolpe, N. 2015. Anaerobic incubation without shaking over a prolonged period as a method to determine mineralizable nitrogen in rice soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 46:2018-2032.

Hirzel, J., Stolpe, N., Rodríguez, F. 2015. Optimizing the nitrogen rate in the rice crop in relation to soil mineralized nitrogen with anaerobic incubation without shaking to different times and temperatures. Afr. J. Agric. Res. 10:4010-4024.

Jensen, L.S., Pedersen, I.S., Hansen, T.B., et al. 2000. Turnover and fate of ^{15}N-labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat. Eur. J. Agron. 12:23-35.

Jing, Q. 2007. Improving resources use efficiency in rice-based cropping systems: Experimentation and modeling. 145 p. Ph.D. thesis. Wageningen Universitat, Wageningen, The Netherlands.

Jing, Q., Bouman, B., van Keulen, H., et al. 2008. Disentangling the effect of environmental factors on yield and nitrogen uptake of irrigated rice in Asia. Agric. Syst. 98(3):177-188.

Jokela, W.E., Randall, G.W. 1997. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on maize. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1695-1703.

Khorsandy, N., Nourbakhsh, F. 2008. Prediction of potentially mineralizable N from amidohydrolase activities in a manure-applied, corn residue-amended soil. Eur. J. Soil Sci. 44:341-346.

Kumura, A. 1956. Studies on the effect of internal nitrogen concentration of rice plant on the constitutional factor of yield. Proc. Crop Sci. Soc. Jpn. 24:177-180.

Kundu, D.K., Ladha, J.K., Lapitan-de Guzman, E. 1996. Tillage depth influence on soil nitrogen distribution and availability in a rice lowland. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:1153-1159.

Lin, D., Fan, X., Hu, F., et al. 2007. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea in rice fields of the Taihue Lake Region. China. Podosphere 17(5):639-645.

Mutters, R. 2000. Producing high quality rice for the export market. Proceedings of the California Plant and Soil Conference. Farming in Crisis-Sustaining Agriculture in California, Stockton, California. 19-20 February. California Chapter of American Society of Agronomy and California Fertilizer Association, California, USA.

Myers, A. 2004. The rice plant: Growth, development, and genetic improvement. p. 30-48. In Champagne, E. (ed.) Rice: Chemistry and technology. 3rd ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA.

Ortega, R. 1989. Fertilización del cultivo. En Alvarado, R. (ed.) Manual de producción de arroz. Serie Quilamapu N°20. p. 59-76. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Ortega, R., Alvarado, A., Belmar, C. 1992. Efecto de la fertilización N-P-K en la selectividad de producción del tallo (*Sclerotium hydrophilum* Sacc.) en arroz. Agric. Téc. (Chile) 52(2):156-161.

Ortega, R., Madariaga, R., Alvarado, R., et al. 1991. Pudrición del tallo en arroz: Fertilización potásica. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile) 49:19-24.

Ricecheck. 2006. Ricecheck recommendations. A guide for rice crop management for improving yields, grain quality and profits and environmental sustainability. New South Wales Department of Primary Industries, Orange, NSW, Australia.

Rodríguez, A., Hoogmoed, W., Brussaard, L. 2008. Soil quality assessment in rice production systems: establishing a minimum data set. J. Environ. Qual. 37:623-630.

Rodríguez, J., Rojas, C. 1977. Efecto de los años de cultivo de arroz en la disponibilidad de nitrógeno del suelo. Respuesta a la fertilización nitrogenada. Cien. Inv. Agr. (Chile) 5(1-2):17-22.

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) 42:15-22.

Rojas-Walker, C. 2008. Relación entre rendimientos relativos de arroz inundado y amonio mineralizado en 20 experimentos de dosis de ANA en arroz: Informe 2008. p. 1-34. Tucapel-UC Proyecto FONTEC.

Sahrawat, K. 2006. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 37:787-796.

Sainz H.R., Echeverría, H.E., Barbieri, P.A. 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. Agron. J. 96:1622-1631.

Scott, D., McLarren, A., Burger, J. 2005. Rapid indices of potential nitrogen mineralization for intensively managed hardwood plantations. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 36:1421-1434.

Sheehy, J.E., Mnzava, M., Cassman, K.G., et al. 2004. Uptake of nitrogen by rice studied with a ^{15}N point-placement technique. Plant Soil 259:259-265.

Shimizu, T. 1967. Processes of yield formation in rice plants from the point of dry matter production (in Japanese). Dry Matter Prod. Crops 4:12-26.

Singh, J.N., Murayama, N. 1963. Analytical studies on the productive efficiency of nitrogen in rice. Soil Sci. Plant Nutr. 9:25-35.

Soon, Y., Haq, A., Arshad, M. 2007. Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 38:2029-2043.

Tanaka, A., Patnaik, S., Abichandani, C.T. 1959. Studies on the nutrition of rice plant. III. Partial efficiency of nitrogen absorbed by rice plant at different stages of growth in relation to yield of rice (*O. sativa*, var. *indica*). Proc. Indian Acad. Sci. Sec. B 49:207-216.

Tinarelli, A. 1989. El arroz. 575 p. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.

Trolldenier, G. 1979. Nitrogenaseaktivitaet in der Rhizosphaere von Sumpfreis in Abhaengigkeit von der Mineralstoffernaehrung. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. Goettingen 29:334-337.

Wienhold, B. 2007. Comparison of laboratory methods and an *in situ* method for estimating nitrogen mineralization in an irrigated silt-loam soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 38:1721-1732.

Wilson, C.E., Norman, R.J., Wells, R.J. 1994. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils. I. Comparison to laboratory indices. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 25(5&6):573-590.

Capítulo 17. Fertilización del cultivo de arroz para sistema de siembra directa

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

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los principales cereales cultivados en el mundo, dada su importancia en la dieta del ser humano (Juliano, 1993; FAO, 2004). Si bien el sistema de siembra más relevante de este cultivo ha sido la inundación permanente, en los últimos años ha comenzado a ser adoptado por los agricultores el sistema de siembra directa (Chauhan et al., 2012; Mahajan et al., 2013). Así lo reportó Zhang et al. (2012) al indicar que el arroz en siembra directa representa alrededor del 90 % de la superficie sembrada con este cultivo en América.

El manejo agronómico del cultivo en siembra directa presenta algunas diferencias con el sistema de inundación permanente, destacándose el escaso movimiento de la superficie del suelo, menores pérdidas de suelo por erosión hídrica, fecha de siembra más temprana, menor necesidad de agua durante los estados iniciales del cultivo, reducción de al menos un 40% de la necesidad hídrica de todo el ciclo de cultivo, control de malezas, menor emisión de gases de efecto invernadero, y respuesta a la fertilización con nitrógeno (N) (Khan et al., 2012; Mahajan et al., 2013; Tao et al., 2016).

Para el cultivo de arroz, el N es el principal nutriente asociado al rendimiento y el empleado en mayor dosis. Sin embargo, la dosis total a utilizar y el manejo de la fertilización nitrogenada, presentan diferencias entre las principales subespecies de arroz (*indica* o *japonica*), variedades, zona geográfica, y otras prácticas realizadas en el cultivo (Angus et al., 1994; Ying et al., 1998; Bouman et al., 2007; Huang et al., 2008; Jing et al., 2008; Hirzel et al., 2011a).

Para ajustar la dosis de N en el cultivo de arroz, es importante conocer la capacidad de entrega natural de N desde el suelo a través de procesos de mineralización (Angus et al., 1994). Esta capacidad es altamente dinámica en el tiempo, difícil de estimar, además de representar sólo una pequeña fracción del N total del suelo (Scott et al., 2005; Wienhold, 2007). Para evaluar esta capacidad, se han desarrollado varios métodos de laboratorio correlacionados con la respuesta del cultivo a la aplicación de N, el consumo de este nutriente por el cultivo, o el rendimiento de grano (Angus et al., 1994; Bushong et al., 2007; Hirzel et al., 2011b; Scott et al., 2005; Sahrawat, 2006; Waring and Bremner, 1964; Wilson et al., 1994). Estos trabajos han generado recomendaciones locales que no pueden ser aplicadas a todos los cultivares o variedades de arroz, sistemas de manejo de cultivo o regiones de cultivo en el mundo.

Desafortunadamente, el manejo del N en los sistemas de siembra directa ha recibido muy poca atención, y el manejo de fertilización, en general, ha sido muy similar a los sistemas de cultivo con inundación permanente (Chen et al., 2018).

Al respecto, estudios reportados por Mahajan et al. (2011) indican que el requerimiento de N en el cultivo de arroz bajo siembra directa es diferente al sistema de cultivo con inundación permanente. Las principales diferencias están relacionadas con el efecto de la saturación del suelo sobre la entrega del N de reserva, la fenología de crecimiento del cultivo, la arquitectura de raíces y la dosis de semilla empleada (Mahajan et al., 2011; 2012). Por ejemplo, Liu et al. (2015) reportaron incrementos significativos en la eficiencia de uso de N para la producción de grano (NUEg), que fluctuaron entre 10,9 % y 47,9 % durante tres temporadas consecutivas para cultivo de arroz en siembra directa, respecto del sistema de inundación permanente. En contraste, Tao et al. (2016) no encontraron diferencias en la NUEg entre ambos sistemas de siembra con una misma dosis de N.

Respecto al manejo óptimo del agua, el sistema de siembra directa genera un considerable ahorro en el uso del recurso hídrico y valores de NUEg mayores al 80 % (Wilson et al., 2000), mientras

que para el sistema de inundación permanente estos valores fluctuaron entre un 30 % y un 40 % (Zheng et al., 2007).

En relación al uso de otros nutrientes, existen diferencias en el manejo entre ambos sistemas de siembra de arroz en función de la zona geográfica. Por ejemplo, en U.S.A. todo el fósforo (P), potasio (K), Azufre (S) y Zinc (Zn) son aplicados como fertilización basal, y el N es aplicado en cualquiera de los siguientes estados: previo a la inundación del cultivo, a media estación entre el inicio de la panícula y diferenciación, o en tres parcialidades, fertilización basal o estado de plántula, previo a la inundación del cultivo y media estación. En Sri Lanka, todo el P es aplicado como fertilización basal, el K es aplicado como fertilización basal o en dos parcializaciones (fertilización basal y estado de panícula), y el N es aplicado en tres o cuatro parcialidades. En Malasia, todo el P y K y 2/3 del N son aplicados a los 15 d después de haber realizado la siembra, y el N faltante es aplicado al estado de inicio de panícula (Kumar y Ladha, 2011).

En Chile, la superficie cultivada con arroz ha fluctuado en los últimos años entre 26 mil y 29 mil ha año^{-1}, de las cuales un 15 % a 20 % son sembradas con el sistema de siembra directa. Para contribuir al conocimiento del manejo de fertilización del cultivo de arroz en siembra directa, se realizó una investigación con dosis crecientes de N, P y K durante dos temporadas consecutivas y en dos localidades representativas de la zona arrocera de Chile. El objetivo fue determinar el efecto de la aplicación de dosis crecientes de N, P y K como experimentos independientes, sobre la producción de grano del nuevo cultivar de arroz ´Digua-CL` (Clearfield) con gran potencial de uso en Chile.

Estudio de caso: fertilización para siembra directa en Chile

El estudio fue realizado en dos suelos arroceros donde se practica monocultivo de arroz, durante las temporadas 2016-2017 y 2017-2018, incluyendo un suelo Alfisol serie Parral (Aquic Haploxeralfs) y un suelo Vertisol serie Quella (Aquic Durixererts) (CIREN, 1997). El clima es del tipo mediterráneo, caracterizado por altas temperaturas, baja pluviometría y temperaturas subóptimas durante el desarrollo del cultivo.

Previo al inicio de los experimentos se colectaron muestras de suelo, desde 0 a 20 cm de profundidad, que fueron analizadas física y químicamente y cuyos resultados se presentan en el Cuadro 1. Para determinar el potencial de suministro de N (mineralización de N amoniacal, N-NH_4^+) se realizaron incubaciones de suelo en condiciones anaeróbicas, para lo cual se utilizaron 5 g de suelo y 12,5 mL de agua destilada que posteriormente fueron incubados en tubos sin agitación, a 20 °C durante un periodo de 21 d (Hirzel y Stolpe, 2014). El amonio extractado del suelo fue determinado con la adición de 12,5 mL de KCl a los tubos de incubación y mezclado con agitación durante 1 h (Mulnavey, 1996), con posterior filtrado y lectura de N-NH_4^+ en un equipo Skalar auto-analizador (Espectrofotómetro de flujo segmentado, modelo San Plus System, Holanda).

Los análisis de suelos fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de INIA Quilamapu, en Chillán, y los procedimientos analíticos empleados son aquellos descritos por Sadzawka et al. (2006). Todas las muestras fueron secadas al aire y tamizadas a 2 mm.

Para optimizar el crecimiento del cultivo de arroz, las parcelas fueron cultivadas con las prácticas agronómicas estándar utilizadas en Chile, con equipo preparador de suelos convencional a una profundidad de 5 cm. La siembra fue realizada con el sistema de siembra directa, en el cual la semilla de arroz fue sembrada con suelo no inundado y mullido. Las parcelas fueron inundadas a los 45 d después de realizada la siembra, manteniendo un nivel de agua entre 5 y 10 cm hasta el estado de inicio de macolla, y entre 10 a 15 cm hasta la madurez fisiológica del cultivo.

En cada suelo y temporada se desarrollaron tres experimentos de fertilización: 1) respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N; 0, 40, 80, 120 y 160 kg de N ha^{-1}; 2) respuesta a la aplicación de dosis crecientes de P; 0, 30, 60 y 120 kg P_2O_5 ha^{-1}; y 3) respuesta a la aplicación de dosis crecientes de K; 0, 30, 60 y 120 kg K_2O ha^{-1}.

Cuadro 1. Propiedades físico químicas (0 a 20 cm de profundidad) de los dos suelos arroceros previo al inicio de los experimentos de fertilización (2016).

Parámetro	Alfisol	Vertisol
Arcilla (%)	31,4	34,4
Limo (%)	31,6	41,3
Arena (%)	37,0	24,3
Densidad aparente (g cm^{-3})	1,67	1,78
Porosidad total (%)	37,0	32,8
$pH_{(suelo:agua\ 1:5)}$	6,44	6,30
Materia orgánica (%)	3,11	2,11
N disponible (mg kg^{-1})	3,0	4,4
P Olsen (mg kg^{-1})	37,3	3,9
K intercambiable ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,22	0,13
Ca intercambiable ($cmol_c\ kg^{-1}$)	11,04	9,29
Mg intercambiable ($cmol_c\ kg^{-1}$)	2,42	5,11
Na intercambiable ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,29	0,30
Al intercambiable ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,02	0,03
S disponible (mg kg^{-1})	9,53	1,00
Fe disponible (mg kg^{-1})	123,11	95,28
Mn disponible (mg kg^{-1})	51,59	81,86
Zn disponible (mg kg^{-1})	0,63	0,29
Cu disponible (mg kg^{-1})	2,22	2,78
B disponible (mg kg^{-1})	0,38	0,03

Para el experimento con dosis crecientes de N, las dosis de P_2O_5 y K_2O fueron de 60 kg ha^{-1} como superfosfato triple y muriato de potasio, respectivamente, aplicados 100 % al momento de la siembra. El N fue aplicado en tres parcialidades: 33 % al momento de la siembra, 33 % al estado de inicio de macolla y 34 % al estado de inicio de la panícula (Hirzel et al., 2011a). Para el experimento con dosis crecientes de P, todo este nutriente fue aplicado al momento de siembra, y las dosis de K_2O y N fueron de 60 y 120 kg ha^{-1}, respectivamente. Para el experimento con dosis crecientes de K, todo este nutriente fue aplicado al momento de siembra, y las dosis de P_2O_5 y N fueron de 60 y 120 kg ha^{-1}, respectivamente. En estos últimos dos experimentos, el N fue aplicado en tres parcialidades: 33 % al momento de la siembra, 33 % al estado de inicio de macolla y 34 % al estado de inicio de panícula. Para la aplicación de P se usó superfosfato triple, para la aplicación de K se usó muriato de potasio, y para el N se empleó urea.

La variedad de arroz empleada en todos los experimentos fue ´Digua Cl`, primera variedad de arroz *japonica* templado de grano largo-ancho, tipo Clearfield en Chile (Paredes et al., 2019). La dosis de semilla usada en todos los experimentos fue 160 kg ha^{-1} y las fechas de siembra fueron el 14 de octubre para la temporada 2016-2017 y el 15 de octubre para la temporada 2017-2018. El control de malezas se realizó después de la emergencia, con una combinación de los herbicidas penoxsulam (Ricer 240 g L^{-1}), MCPA (MCPA 750 SL 750 g L^{-1}), y bentazon (Basagran 480 g L^{-1}) en dosis de 0,03; 0,19; y 0,72 kg de ingrediente activo (i.a.) ha^{-1}. En todos los experimentos el cultivo fue

cosechado en madurez de grano con un 18 % de humedad, durante el mes de marzo, en ambas temporadas.

Los parámetros evaluados fueron rendimiento de grano y eficiencia de uso agronómico del N (kg de grano producido por kg de N aplicado). Para las evaluaciones de rendimiento se colectaron muestras de 1 x 2 m desde cada parcela. El contenido de humedad en el grano fue determinado con un equipo medidor de humedad Satake modelo SS-5 (Sharma Agrico Industries, West Bengal, India) y el rendimiento de grano fue ajustado a un 14,5 % de humedad (Hirzel et al., 2011b).

Para cada experimento con dosis crecientes de N, P o K se usó un diseño experimental de bloques con arreglo en parcelas sub-divididas, donde la parcela principal correspondió a la localidad (suelo), la sub-parcela correspondió a la temporada, y la sub-sub parcela correspondió a la dosis creciente del nutriente evaluado (N, P o K, Foto 1).

Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza. Cuando hubo diferencia significativa entre tratamientos, se empleó el test de Tukey para separar el efecto de cada tratamiento, considerando un 5 % de significancia. El software empleado fue SAS (SAS Institute, 1989). Adicionalmente, cuando hubo interacción entre suelos, temporadas y/o dosis de nutrientes, se realizaron análisis de contrastes para separar efectos de cada suelo, cada temporada y de dosis diferentes de cada nutriente (Hirzel et al., 2011a).

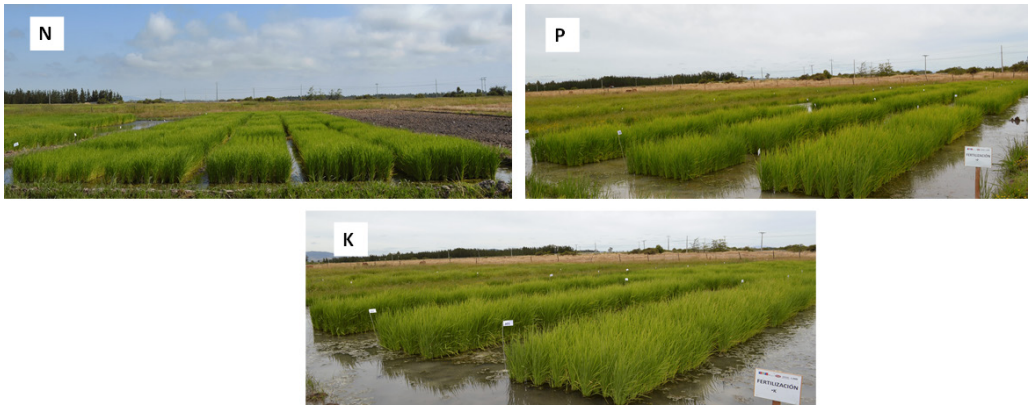


Foto 1. Fertilización de la variedad ´Digua CL` con N, P y K en la localidad de Parral. Temporada 2016-2017.

Resultados y discusión

Propiedades de suelo previo al inicio de los experimentos

Las propiedades físico químicas de cada suelo presentaron pocas limitaciones para el cultivo de arroz (Cuadro 2). Cabe destacar al respecto, una baja concentración de potasio (K) en ambos suelos, y bajas concentraciones de fósforo (P), azufre (S), zinc (Zn) y boro (B) en el suelo Vertisol. También es importante destacar el alto contenido de materia orgánica (MO) y hierro (Fe) disponible en el suelo Alfisol, respecto del suelo Vertisol, en relación al promedio de valores de suelos arroceros de Chile (Hirzel et al., 2011a). Este contenido de MO y Fe disponible están asociados a una mayor capacidad de entrega de N por el suelo, y una probable menor respuesta del cultivo a la aplicación de N (Sahrawat, 2006; Rodríguez de Lima et al., 2008; Hirzel y Stolpe, 2014).

Parámetros agronómicos en el cultivo de arroz

Dosis crecientes de N

Para el experimento con dosis crecientes de N, el análisis estadístico indicó que el rendimiento de grano fue afectado significativamente por el suelo, temporada y dosis de N ($p<0,01$) (Cuadro 3). Los resultados obtenidos presentaron una interacción significativa entre el suelo y la dosis de N ($p<0,01$) y el NUAE fue afectado, también significativamente, por el suelo, temporada y dosis de N ($p<0,01$).

Al comparar entre suelos como promedio de temporadas y dosis de N (Cuadro 4), el mayor rendimiento de grano y NUAE se logró en el suelo Alfisol ($p<0,05$) con incrementos de rendimiento de grano y NUAE de 1,55 y 18,9 t ha^{-1}, respectivamente, en relación al suelo Vertisol. En tanto, al comparar entre temporadas como promedio de suelos y dosis de N, el mayor rendimiento de grano y NUAE se logró en la temporada 2017-2018 ($p<0,05$), con incrementos de rendimiento de grano y NUAE de 0,51 y 8,6 t ha^{-1}, respectivamente, en relación a la temporada 2016-2017.

El menor rendimiento de grano obtenido en la temporada 2016-2017 probablemente obedece a las altas temperaturas imperantes durante el estado reproductivo del cultivo (iniciación de panícula), con una temperatura máxima promedio mensual en enero del 2017 de 30,7 °C (San Carlos) y de 33,6 °C (Parral) (Cuadro 1A), y con valores máximos que llegaron a 39 °C y 44 °C para San Carlos (suelo Alfisol) y Parral (suelo Vertisol), respectivamente (datos no mostrados).

Cuadro 1A. Características climáticas de cada localidad, temporadas 2016, 2017 y 2018.

Mes	Alfisol (San Carlos)						Vertisol (Parral)					
	2016		2017		2018		2016		2017		2018	
	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM
Enero	13,0	29,8	12,5	30,7	11,8	28,8	12,4	30,2	13,8	33,6	11,6	31,0
Febrero	11,2	29,5	12,5	29,3	11,7	30,0	11,4	31,8	12,6	31,3	11,9	32,4
Marzo	9,3	27,8	9,1	24,9	8,7	25,3	9,1	30,4	9,3	27,6	8,3	27,8
Abril	7,2	18,6	7,3	21,0	5,7	19,3	6,3	20,3	6,3	23,8	5,1	22,4
Mayo	7,8	16,2	4,1	13,8	5,4	14,9	7,3	18,1	3,9	16,2	4,3	18,2
Junio	1,6	11,3	4,3	11,9	2,1	10,9	0,9	14,0	3,6	13,7	1,3	14,0
Julio	4,0	11,6	2,6	12,2	2,3	12,2	2,7	13,2	1,8	14,5	1,9	14,3
Agosto	4,6	14,4	3,9	12,7	2,9	13,8	3,5	16,9	3,2	14,3	1,9	16,5
Septiembre	5,5	19,6	4,4	16,3	6,1	17,1	3,7	22,1	3,4	18,1	5,6	19,1
Octubre	7,2	20,1	6,4	18,0	6,5	18,4	6,5	22,5	6,0	19,8	5,6	20,2
Noviembre	9,0	25,3	9,0	22,9	9,1	23,1	8,3	27,3	8,5	25,1	8,0	25,9
Diciembre	10,4	26,6	10,7	27,6	10,5	27,2	10,0	28,0	10,7	29,7	9,6	29,4
Promedio	7,6	20,9	7,2	20,1	6,9	20,1	6,8	22,9	6,9	22,3	6,3	22,6

Tm: temperatura mínima (°C); TM: temperatura máxima (°C).

Además, la evapotranspiración de referencia de enero de 2017 fue superior que otras temporadas, con valores de 237,1 mm (San Carlos) y 202,9 mm (Parral) (Cuadro 1B). Al respecto, altas temperaturas (>35 °C) durante estados reproductivos del cultivo de arroz pueden causar esterilidad floral y bajo rendimiento de grano (Wang et al., 2019). En adición, altas temperaturas durante el estado de iniciación de panícula (>38 °C) inducen degeneración de la panícula (Jagadish et al., 2013; Wang et al., 2015, Wu et al., 2017), con daño celular por incremento en la producción de radicales peróxidos (Fu et al., 2015), reducción en el número de espiguillas e inhibición de la formación de anteras (Wang et al., 2016).

Cuadro 1B. Características climáticas de cada localidad, temporadas 2016, 2017 y 2018.

Mes	Alfisol (San Carlos)						Vertisol (Parral)					
	2016		2017		2018		2016		2017		2018	
	pp	ET_o	pp	ET_o	pp	ET_o	pp	ET_o	pp	ET_o	pp	ET_o
Enero	6,3	188,8	2,2	237,1	1,5	188,3	0,9	180,9	0,3	202,9	0,0	181,7
Febrero	0,0	178,7	23,4	156,2	0,1	157,5	0,0	174,3	0,3	134,2	4,5	146,8
Marzo	2,8	139,1	19,2	121,7	3,9	137,3	0,1	130,2	10,4	105,3	16,8	128,8
Abril	78,8	59,9	62,4	73,6	64,4	61,7	61,0	54,2	18,0	69,5	16,7	56,9
Mayo	56,8	31,3	96,2	32,4	89,3	29,7	56,1	27,9	68,2	30,1	36,2	26,1
Junio	14,2	22,5	201,4	39,1	94,2	19,9	8,7	20,8	59,5	23,5	45,2	19,6
Julio	147,2	24,5	92,2	29,9	96,0	27,5	85,8	22,6	100,6	28,4	108,9	26,7
Agosto	46,0	46,9	231,0	38,6	81,0	40,9	14,5	45,6	154,7	38,7	43,0	41,3
Septiembre	11,9	84,4	74,7	69,5	109,4	70,8	7,1	86,1	47,9	70,6	61,2	72,6
Octubre	66,7	103,5	68,3	95,6	77,2	91,2	49,9	106,9	38,6	98,4	46,6	92,9
Noviembre	11,6	160,4	45,0	136,9	65,2	132,8	5,4	152,7	22,2	140,9	17,3	131,3
Diciembre	16,9	174,9	8,9	180,3	14,8	176,5	9,2	164,0	2,3	183,1	1,6	157
Acumulado	459,2	1214,9	924,9	1210,9	729,0	1134,1	298,7	1166,2	523,0	1125,6	398,0	1081,7

pp: precipitación (mm); ET_o: evapotranspiración de referencia (mm).

En general, los valores de rendimiento de grano y NUAE fueron normales para la zona geográfica en la cual se realizaron estos experimentos (Artacho et al., 2009; Hirzel et al., 2011b; Hirzel y Rodríguez, 2016).

El mayor rendimiento obtenido en el suelo Alfisol puede estar asociado a su mayor contenido de MO y Fe disponible (Cuadro 2), parámetros de suelo asociados con el potencial de N mineralizable desde el suelo (Sahrawat, 2006; Rodríguez et al., 2008; Hirzel y Rodríguez, 2016). También se debe mencionar una mayor concentración de S, Zn y B disponible en el suelo Alfisol, que puede permitir la obtención de un mayor rendimiento potencial respecto del suelo Vertisol.

El efecto de interacción suelo x dosis de N sobre el rendimiento de grano (Figura 1A y 1B) indicó una respuesta significativa al aumento en la dosis de N ($p<0,05$). Para el suelo Alfisol, el mayor rendimiento se logró con la dosis de 120 kg N ha^{-1} ($p<0,05$) (Figura 1A). Por su parte, en el suelo Vertisol el mayor rendimiento se logró con la dosis de 160 kg N ha^{-1} que sólo fue mayor al control sin N y al tratamiento con 40 kg N ha^{-1} ($p<0,05$) (Figura 1B). El suelo Vertisol mostró mayor respuesta de incremento de rendimiento, logrando un aumento de 3,6 t ha^{1} respecto del control sin N, en tanto que para el suelo Alfisol, este incremento respecto del control sin N fue de sólo 2,2 t ha^{-1} (Figura 1A). La diferencia de respuesta en estos suelos está asociada a la menor capacidad de mineralización de N del suelo Vertisol (mayor dependencia de la fertilización nitrogenada para maximizar el rendimiento de grano), considerando su menor contenido de MO y Fe disponible (Cuadro 2), anteriormente analizado (Sahrawat, 2006; Rodríguez de Lima et al., 2008; Hirzel y Rodríguez, 2016).

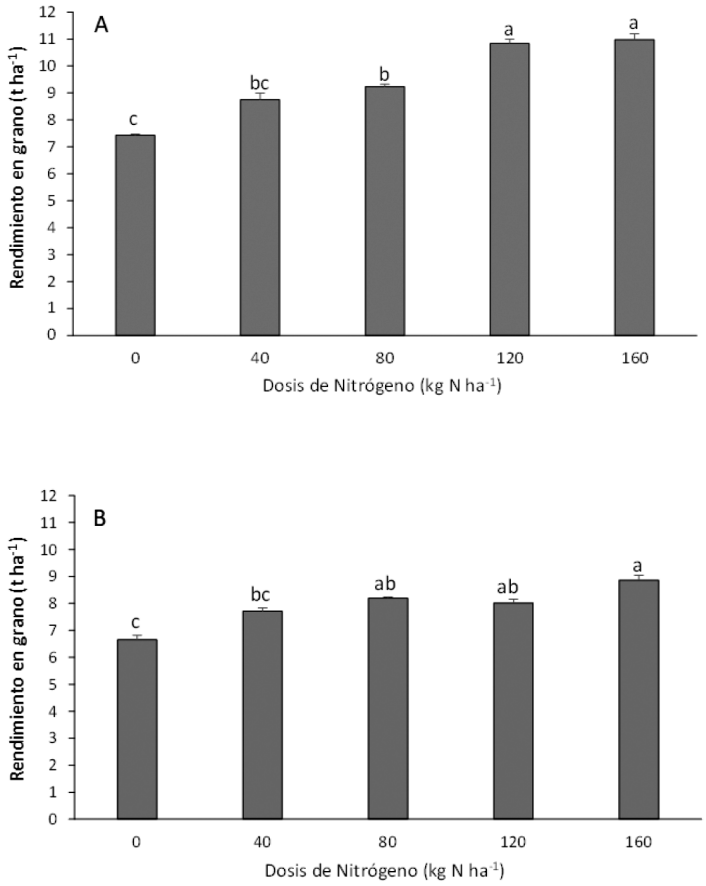


Figura 1. Rendimiento de grano en arroz con dosis crecientes de nitrógeno: A) Alfisol serie Parral y B) Vertisol serie Quella, como promedio de dos temporadas (2016-2017 y 2017-2018). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$).
Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

La respuesta obtenida a la dosis creciente de N con el sistema de siembra directa en la zona de estudio fue mayor que lo reportado para sistemas de siembra tradicional por algunos autores (Ortega, 2007; Hirzel et al., 2011b; Hirzel y Rodríguez, 2016). Sin embargo, Artacho et al. (2009) reportaron respuesta en rendimiento de grano a dosis de N entre 160 y 200 kg ha^{-1} para el sistema de siembra tradicional de arroz en la misma zona de estudio, aunque no señalan el número de parcialidades utilizadas.

En relación al NUAE (Figura 2), como promedio de los dos suelos y dos temporadas, como era esperable, se presentó una relación inversamente proporcional entre el NUAE y la dosis de fertilización nitrogenada. Además, hubo una significativa reducción de este valor ($p<0,05$) con el incremento en la dosis de N, considerando que en los suelos evaluados el mayor rendimiento se logró con dosis entre 120 y 160 kg ha^{-1} (Alfisol y Vertisol, respectivamente). Los valores de NUAE asociados a estos rendimientos fluctuaron entre 74 y 61 kg de grano producido por kg de N aplicado, para cada dosis de N, respectivamente. Estos valores fueron levemente mayores que los indicados por Thind et al. (2018) para su experimento de arroz en siembra directa con dosis de N entre 120 y 180 kg ha^{-1}, cuyo rendimiento máximo (6,6 t ha^{-1}) fue menor a los obtenidos en el experimento.

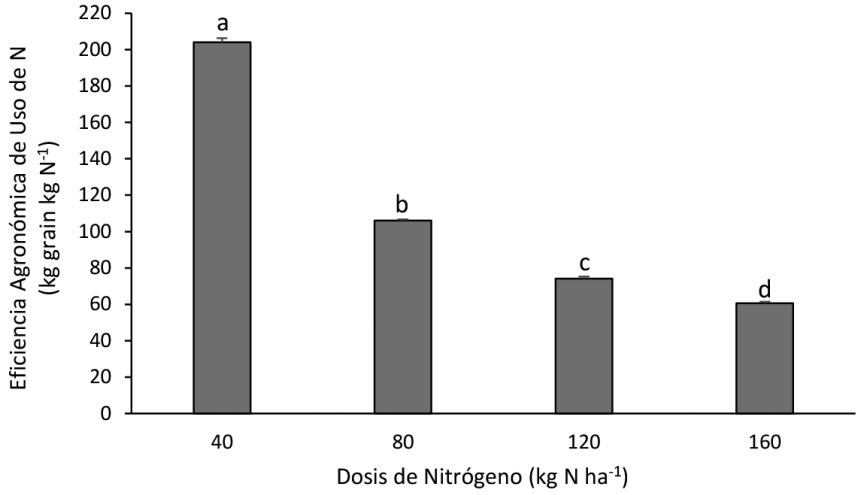


Figura 2. Eficiencia Agronómica de Uso del Nitrógeno (NUAE) con cuatro dosis crecientes de N como promedio de dos suelos (Alfisol serie Parral y Vertisol serie Quella) y dos temporadas (2016-17 y 2017-18). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$). Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

Dosis crecientes de P

El análisis estadístico indicó que el rendimiento de grano fue afectado significativamente por el suelo ($p<0,05$), temporada y dosis de P ($p<0,01$) (Cuadro 3). Sin embargo, hubo interacción significativa entre el suelo y la dosis de P ($p<0,01$), y entre la temporada y la dosis de P ($p<0,01$).

Cuadro 3. Análisis de significancia de rendimiento de grano para los experimentos con dosis crecientes de nitrógeno, fósforo y potasio, y para la eficiencia agronómica de uso de nitrógeno (NUAE) en el experimento de dosis crecientes de nitrógeno.

Parámetro	**Suelo (S)**	**Temporada (T)**	**Dosis N (N)**	**Interacción S x T**	**Interacción S x N**	**Interacción T x N**	**Interacción * T x N**
Rendimiento	**	**	**	NS	**	NS	NS
NUAE	**	**	**	NS	NS	NS	NS
	Suelo (S)	**Temporada (T)**	**Dosis P (P)**	**Interacción S x T**	**Interacción S x P**	**Interacción T x P**	**Interacción S x T x P**
Rendimiento	*	**	**	**	NS	**	NS
	Suelo (S)	**Temporada (T)**	**Dosis K (K)**	**Interacción S x T**	**Interacción S x K**	**Interacción T x K**	**Interacción S x T x K**
Rendimiento	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* Significativo a $p < 0,05$; ** Significativo a $p < 0,01$; NS: no significativo.

Al comparar entre suelos como promedio de temporadas y dosis de P (Cuadro 4), el mayor rendimiento de grano se logró en el suelo Alfisol ($p<0,05$), con incrementos de rendimiento de grano de 0,37 t ha^{-1}, respecto al suelo Vertisol. Esto fue coincidente con lo obtenido en el experimento de dosis crecientes de N. Por su parte, al comparar entre temporadas como promedio de suelos y dosis de P, el mayor rendimiento de grano se logró en la temporada 2016-2017 ($p<0,05$), con incrementos de rendimiento de grano de 0,76 t ha^{-1} respecto a la temporada 2017-2018. Este resultado contrasta con lo obtenido para el experimento con dosis crecientes de N. Sin embargo, se debe considerar que, para el experimento de dosis crecientes de P, se usó una misma dosis de N de 120 kg ha^{-1}, en tanto que en el experimento de dosis crecientes de N se utilizaron diferentes dosis que, como promedio de los tratamientos, fueron de 80 kg ha^{-1}, lo cual pudo haber reducido el rendimiento potencial del cultivo en este sistema de siembra directa (Mahajan et al., 2011; 2012). Como se puede corroborar en el Cuadro 4, el rendimiento promedio de los suelos o temporadas fue de 8,67 y 9,36 Mg ha^{-1} en los experimentos con dosis crecientes de N y P, respectivamente.

Cuadro 4. Rendimiento de grano en arroz en dos suelos y dos temporadas como promedio de diferentes dosis de N y P, y eficiencia de uso agronómico de nitrógeno (NUAE) en dos suelos y dos temporadas como promedio de diferentes dosis de nitrógeno.

Experimento	Parámetro	Suelo		Temporada	
		Alfisol	Vertisol	2016-2017	2017-2018
Dosis crecientes de N	Rendimiento (t ha^{-1})	9,44 a*	7,89 b	8,41 b	8,92 a
	NUAE	123,2 a	104,3 b	109,5 b	118,1 a
Dosis crecientes de P	Rendimiento (t ha^{-1})	9,17 b	9,54 a	9,74 a	8,98 b

*Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas entre suelos o temporadas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$).

Las dosis crecientes de P en el suelo Alfisol durante ambas temporadas (Figura 3A y 3B) no tuvieron efecto significativo sobre el rendimiento de grano ($p>0,05$). Por su parte, las dosis crecientes de P en el suelo Vertisol durante ambas temporadas (Figura 4A y 4B) sólo afectaron el rendimiento de grano en la temporada 2016-2017 ($p<0,05$) (Figura 4A). En este suelo y en la temporada 2016-2017, el menor rendimiento de grano se obtuvo en el control sin P ($p<0,05$), sin diferencias entre los tratamientos, en los cuales se aplicó diferentes dosis de P ($p>0,05$).

La respuesta encontrada a la aplicación de P en el suelo Vertisol para la primera temporada de evaluación, puede estar asociada a la baja concentración de este nutriente en el suelo (Cuadro 2), en tanto que en suelo Alfisol era esperable la ausencia de respuesta a la adición de P, considerando la alta concentración de P disponible en el suelo al inicio de los experimentos. No obstante, en el suelo Vertisol se habría esperado respuesta a la aplicación de P durante la segunda temporada de evaluación, efecto no encontrado (Figura 4B), a pesar que los rendimientos promedio en este suelo fueron similares entre temporadas (9,52 y 9,56 t ha^{-1} en las temporadas 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente). Al respecto, Frageria et al. (2011) indican que el ambiente anaeróbico generado en suelos sometidos a inundación produce cambios en la rizósfera, con disminución en las reacciones de óxido-reducción del suelo que finalmente se traduce en mayor disponibilidad de P y de otros nutrientes.

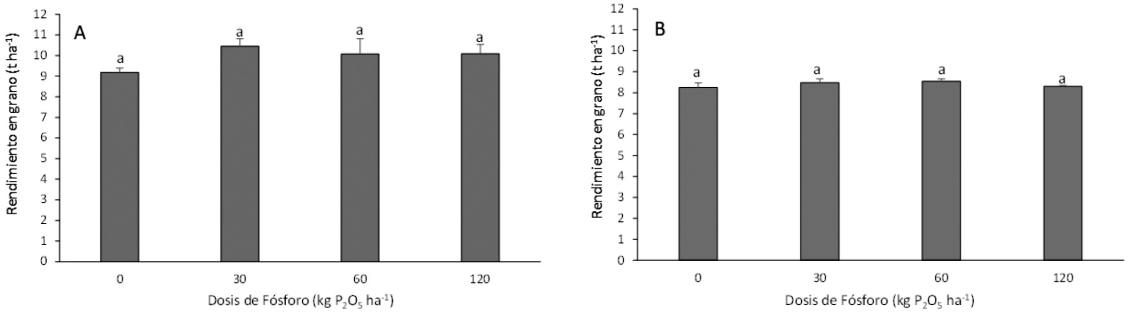


Figura 3. Rendimiento de grano en arroz con dosis crecientes de fósforo en el suelo Alfisol (serie Parral) para las temporadas: A) 2016-2017, y B) 2017-2018. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$). Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

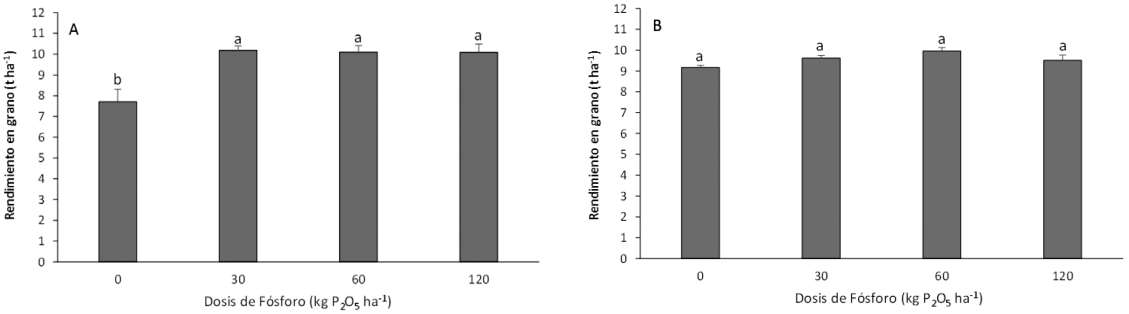


Figura 4. Rendimiento de grano en arroz con dosis crecientes de fósforo en el suelo Vertisol (serie Quella) para las temporadas: A) 2016-2017 y B) 2017-2018. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$). Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

Conclusiones y recomendaciones

El cultivo de arroz realizado en siembra directa presentó una respuesta positiva a la aplicación de dosis crecientes de nitrógeno en los dos suelos arroceros evaluados (Alfisol serie Parral y Vertisol serie Quella). Sin embargo, la respuesta a la aplicación de fósforo fue muy baja y sólo se presentó en el suelo Vertisol, y no hubo respuesta a la aplicación de potasio en ninguno de los suelos arroceros.

Las dosis de nitrógeno que permitieron obtener los mayores rendimientos de grano en el cultivo de arroz, fueron de 120 kg ha^{-1} en el suelo Alfisol y de 160 kg ha^{-1} en el suelo Vertisol. Los valores de eficiencia de uso agronómico de nitrógeno (NUAE), asociados a estas dosis de nitrógeno, fueron de 74 y 61 kg de grano producido por kg de nitrógeno aplicado, respectivamente.

Por último, con los resultados anteriores y en base a la experiencia de conocimiento de las propiedades químicas de los suelos arroceros de Chile, se presentan los Cuadros 5 y 6, con recomendaciones de dosis de nutrientes a usar en el cultivo de arroz en función de diferentes niveles de fertilidad de suelo, para escenarios de rendimiento alto y medio.

Cuadro 5. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de siembra directa en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial alto (7,1 a 10,0 t ha^{-1}).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha^{-1})
N*	N mineralizable (mg kg^{-1})	< 20	170 – 180
		21 – 40	140 – 160
		> 41	100 – 130
P_2O_5**	P Olsen (mg kg^{-1})	< 5	55 – 60
		6 – 12	45 – 50
		> 12	30 – 40
K_2O**	K intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,3	55 – 60
		0,3 – 0,5	35 – 50
		> 0,5	0 – 30
$CaCO_3$***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,8	15 – 20
		0,8 – 1,2	10 – 15
		> 1,2	0 – 10
S	S disponible (mg kg^{-1})	< 8	15 – 20
		8 – 12	10 – 15
		> 12	0 – 10
B	B disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5
Zn	Zn disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos, se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P y entre 30 % y 40 % de la dosis sugerida para K.

***La dosis de $CaCO_3$ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a cal comercial, de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando $CaCO_3$*$MgCO_3$ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por lo tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Cuadro 6. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de siembra directa en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial medio (5 a 7 t ha^{-1}).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha^{-1})
N*	N mineralizable (mg kg^{-1})	< 20	140 – 160
		21 – 40	120 – 130
		> 41	100 – 110
P_2O_5**	P Olsen (mg kg^{-1})	< 5	45 – 50
		6 – 12	35 – 40
		> 12	20 – 30
K_2O**	K intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,3	45 – 50
		0,3 – 0,5	35 – 40
		> 0,5	0 – 30
$CaCO_3$***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable ($cmol_+$ kg^{-1})	< 0,8	12 – 15
		0,8 – 1,2	8 – 12
		> 1,2	0 – 8
S	S disponible (mg kg^{-1})	< 8	12 – 15
		8 – 12	8 – 12
		> 12	0 – 8
B	B disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4
Zn	Zn disponible (mg kg^{-1})	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P y entre 30 % y 40 % de la dosis sugerida para K.

***La dosis de $CaCO_3$ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a cal comercial de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando $CaCO_3$*$MgCO_3$ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por lo tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Referencias

Angus, J.F., Ohnishi, M, Horie, T., et al. 1994. A preliminary study to predict net nitrogen mineralization in a flooded rice soil using anaerobic incubation. Aust. J. Exp. Agric. 34:995-999.

Artacho, P., Bonomelli, C., Meza, F. 2009. Nitrogen application in irrigated rice growth in Mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency. J. Plant Nutr. (Jpn.) 32:1574-1593.

Bouman, B., Humphreys, E., Tuong, T.P., et al. 2007. Rice and water. Adv. Agron. 92:187-237.

Bushong, J.T., Norman, R.J., Ross, W.J., et al. 2007. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 38:2799-2813.

CIREN. 1997. Descripción de suelos, materiales y símbolos, estudio agrológico VII Región. Publicación N°117. 659 p. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile.

Chauhan, B.S., Mahajan, G., Sardana, V., et al. 2012 Productivity and sustainability of the rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic Plains of the Indian subcontinent: problems, opportunities, and strategies. Adv. Agron. 117:315-369.

Chen, Q., Peng, S., Dong, H., et al. 2018. Optimal nitrogen fertilizer management for direct seeding rice: A review. Int. J. Agri. Biol. 20:1382-1390.

FAO. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH_3, NO y N_2O provenientes de las tierras agrícolas. FAO, Roma, Italia.

Frageria, N.K., Carvalho, G.D., Santos, A.B., et al. 2011. Chemistry of Lowland Rice Soils and Nutrient Availability. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 42:1913-1933.

Fu, G.F., Zhang, C.X., Yang, X.Q., et al. 2015. Action mechanism by which SA alleviates high temperature-induced inhibition to spikelet differentiation. Chin. J. Rice Sci. 29:637-647.

Hirzel, J., Cordero, K., Fernández, C., et al. 2011b. Soil potentially mineralizable nitrogen and its relation to rice production and nitrogen needs in two paddy rice soils of Chile. J. Plant Nutr. (Jpn.) 35:396-412.

Hirzel, J., Pedreros, A., Cordero, K. 2011a. Effect of nitrogen rates and split nitrogen fertilization on grain yield and its components in flooded rice. Chil. J. Agric. Res. 71:437-444.

Hirzel, J., Rodríguez, F. 2016. Response of rice to increasing nitrogen rates in five soils with different mineralizable nitrogen levels. J. Plant Nutr. (Jpn.) 40(3):382-390.

Hirzel, J., Stolpe, N. 2014. Anaerobic incubation without shaking over a prolonged period as a method to determine mineralizable nitrogen in rice soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 46:2018-2032.

Huang, J., He, F., Cui, K., et al. 2008. Determination on optimal nitrogen rate for rice varieties using a chlorophyll meter. Field Crops Res. 105:70-80.

Jagadish, S.V.K., Craufurd, P., Shi, W., et al. 2013. A phenotypic marker for quantifying heat stress impact during microsporogenesis in rice (*Oryza sativa* L.) Funct. Plant Biol. 41:48-55.

Jing, Q., Bouman, B., van Keulen, H., et al. 2008. Disentangling the effect of environmental factors on yield and nitrogen uptake of irrigated rice in Asia. Agric. Syst. 98(3):177-188.

Juliano, B.O. 1993. Rice in human nutrition. FAO Food and Nutrition Series N°26. FAO, Rome, Italy/ International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.

Khan, A.W., Mann, R.A., Saleem, M., et al. 2012. Comparative rice yield and economic advantage of foliar KNO_3 over soil applied K_2SO_4. Pak. J. Agric. Sci. 49:481-484.

Kumar, V., Ladha, J.K. 2011. Direct seeding of rice: recent developments and future research needs. Adv. Agron. 111:297-413.

Li, D., Fan, X., Hu, F., et al. 2007. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake Region, China. Pedosphere 17(5):639-645.

Liu, H., Hussain, S., Zheng, M., et al. 2015. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China. Agron. Sust. Dev. 35:285-294.

Mahajan, G., Chauhan, B.S., Gill, M.S. 2011. Optimal nitrogen fertilization timing and rate in dry-seeded rice in northwest India. Agron. J. 103:1676-1682.

Mahajan, G., Chauhan, B.S., Gill, M.S. 2013. Dry-seeded rice culture in Punjab state of India: lessons learned from farmers. Field Crops Res. 144:89-99.

Mahajan, G., Chauhan, B.S., Timsina, J., et al. 2012. Crop performance and water-and nitrogen-use efficiencies in dry-seeded rice in response to irrigation and fertilizer amounts in northwest India. Field Crops Res. 134:59-70.

Mulnavey, L.R. 1996. Nitrogen Inorganic forms. p. 1123-1184. In Bartels, J.M. (ed.) Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Ortega, R. 2007. Analysis of factors affecting spikelet sterility in flooded rice under field conditions in Chile. Arch. Agron. Soil Sci. 53:183-192.

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.) Sistema de producción de arroz Clearfield. Boletín INIA N°397. 52 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Rodrigues de Lima, A., Hoogmoed, W., Brussaard, L. 2008. Soil quality assessment in rice production systems: establishing a minimum data set. J. Environ. Qual. 37:623-630.

Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., et al. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Serie Actas INIA N°34. 164 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

Sahrawat, K. 2006. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 37:787-796.

SAS Institute. 1989. Usage and reference. Version 6. 501 p. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.

Scott, D., McLarren, A., Burger, J. 2005. Rapid indices of potential nitrogen mineralization for intensively managed hardwood plantations. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 36:1421-1434.

Tao, Y., Chen, Q., Peng, S., et al. 2016. Lower global warming potential and higher yield of wet direct-seeded rice in Central China. Agron. Sustain. Dev. 36:1-9.

Thind, H.S., Yadvinder-Singh, Sharma, S., et al. 2018. Optimal rate and schedule of nitrogen fertilizer application for enhanced yield and nitrogen use efficiency in dry-seeded rice in north-western India. Arch. Agron. Soil Sci. 64:196-207.

Wang, Y., Wang, L., Zhou, J., et al. 2019. Research progress on heat stress of rice at flowering stage. Rice Sci. 26:1-10.

Wang, Y.L., Zhang, Y.P., Zeng, Y.H., et al. 2015. Effect of high temperature stress on rice spikelet differentiation and degeneration during panicle initiation stage. Chin. J. Agron. 36:724-731.

Wang, Y.L., Zhang, Y.P., Zhu, D.F., et al. 2016. Effect of heat stress on spikelet degeneration and grain filling at panicle initiation period of rice. Acta Agron. Sin. 42:1402-1410.

Waring, S.A., Bremner, J.M. 1964. Ammonium production in soil under water-logged conditions as an index of nitrogen availability. Nature 202:951-952.

Wienhold, B. 2007. Comparison of laboratory methods and an *in-situ* method for estimating nitrogen mineralization in an irrigated silt-loam soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 38:1721-1732.

Wilson. C.E., Norman, R.J. Wells, B.R. 1994. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils: I. Comparison to laboratory indices. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 25(56):573-590.

Wilson, C., Slaton, N., Norman, R., et al. 2000. Efficient use of fertilizer. In Rice production handbook. Cooperative Extension Service. Chapter 8:51-74. University of Arkansas, Division of Agriculture, Little Rock, Arkansas, USA.

Wu, C., Cui, K.H., Wang, W.C., et al. 2017. Heat-induced cytokinin transportation and degradation are associated with reduced panicle cytokinin expression and fewer spikelets per panicle in rice. Front. Plant Sci. 8:371.

Ying, J. S., Peng, G., Yang, N., et al. 1998. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments – II. Nitrogen accumulation and utilization efficiency. Field Crops Res. 57:85-93.

Zhang, Y., Zhu, D., Xiong, H., et al. 2012. Development and transition of rice planting in China. Agric. Sci. Technol. 13:1270-1276.

Zheng, Y.M., Ding, Y.F., Wang, Q.S., et al. 2007. Effect of nitrogen applied before transplanting on NUE in rice. Agric. Sci. Chin. 6:842-848.

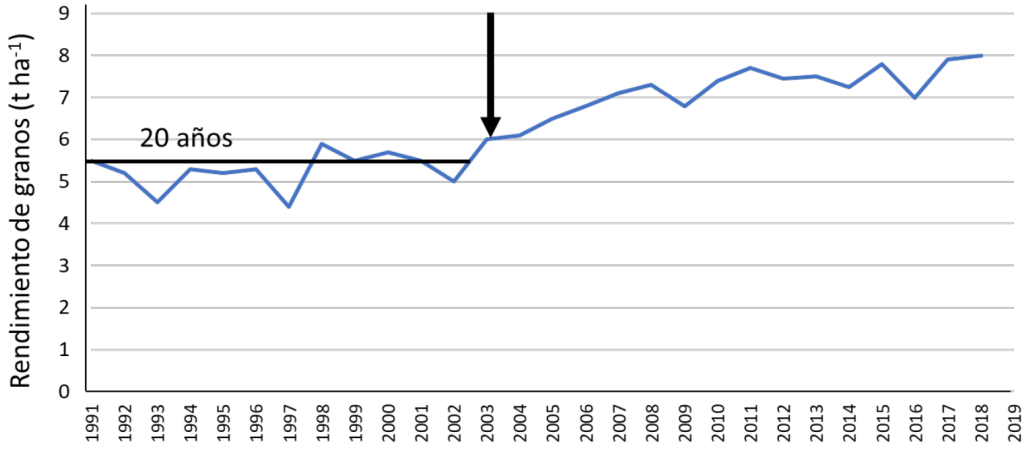
Capítulo 18. Manejo del arroz rojo a través de herbicidas imidazolinonas en cultivares resistentes en Brasil

Aldo Merotto Jr., Catarine Markus, André Andres, Germani Concenço

Los problemas relacionados con el arroz rojo (arroz maleza) ocurren prácticamente en todas las áreas del cultivo del arroz en el mundo. En Brasil, la tecnología Clearfield (variedades resistentes a herbicidas imidazolinonas) está en uso desde el año 2000. Durante este período ocurrieron grandes cambios en el manejo de las labores, rendimiento de grano y costos de la producción.

Antes de la tecnología Clearfield no existía la posibilidad de controlar el arroz maleza a través de herbicidas selectivos en el cultivo del arroz. En un período de 20 años, antes del inicio de la tecnología Clearfield, el rendimiento de arroz en el estado de Rio Grande do Sul (RS) era de aproximadamente 5,5 t ha^{-1}. Después del inicio de esta tecnología, el rendimiento tuvo incrementos continuos, alcanzando valores aproximados a 7,5 t ha^{-1} (Figura 1). Este aumento fue generado por el control del arroz maleza, lo que permitió el uso adecuado de las prácticas de manejo, como la época y densidad de siembra, junto con la posibilidad de usar mayores cantidades de fertilizantes, los cuales pudieron ser usados de forma más eficiente por el cultivo del arroz.

De esta forma, el manejo era realizado por medio de la preparación repetida del suelo con anterioridad a la siembra del cultivo, como una forma de disminuir la infestación. En las áreas infestadas con arroz maleza, este procedimiento resultaba en un atraso en la fecha de siembra, lo cual imposibilitaba un mejor uso de las condiciones ambientales para el cultivo del arroz, principalmente la radiación solar. Entretanto, con este procedimiento era común que se presentaran altas densidades de arroz maleza, aprovechándose de la fertilización aplicada al cultivo. En este período, el barbecho era utilizado como una forma de disminuir la infestación del arroz maleza; aun así, un gran número de áreas se declararon no aptas para el cultivo del arroz.



Fuente: IRGA, 2002.

Figura 1. Evolución del rendimiento de los arrozales en el estado de Rio Grande do Sul. La flecha indica el inicio en el uso de la tecnología Clearfield.

La ganancia del rendimiento de grano relacionada con la tecnología Clearfield fue, aproximadamente, de 2 t ha^{-1} en un área de 1,25 millones de ha de cultivo de arroz del estado de RS. De esta forma, se puede estimar que el control del arroz maleza a través de las variedades resistentes a herbicidas tuvo un incremento anual aproximado de $ 500 millones de dólares en la agricultura de RS. Entretanto, la aparición paulatina de resistencia a los herbicidas en el arroz maleza, constituyó un problema para la mantención de este beneficio.

La presencia de arroz maleza resistente a herbicidas imidazolinonas (IMI) se constituyó como el principal problema de la tecnología Clearfield para las localidades donde este sistema de producción estaba en uso, y se recomendaba observar con especial atención en los lugares donde la utilización de variedades de arroz resistentes a herbicidas estaba comenzando. La persistencia de los herbicidas IMI en el suelo, también podría ser un problema de la tecnología Clearfield. La complejidad de la utilización de los herbicidas, en relación a la época y dosis de aplicación y variaciones asociadas al manejo del cultivo, también son aspectos importantes que deben ser considerados en el uso de herbicidas IMI en la tecnología Clearfield.

El objetivo de este capítulo es presentar los principales resultados de investigación y sus aplicaciones en relación a la ocurrencia de resistencia a herbicidas en arroz maleza, persistencia de herbicidas IMI en el suelo, y aspectos de manejo del cultivo de malezas asociados a la utilización de la tecnología Clearfield en Brasil.

Características relacionadas con la presencia de arroz maleza resistente a herbicidas imidazolinonas

Presencia de resistencia

Se realizó un estudio de larga duración basado en el monitoreo de la resistencia durante las temporadas 2006-2007 a 2011-2012, para evaluar la resistencia a imazetapir + imazapic en aproximadamente 1.000 poblaciones de arroz maleza colectadas en el estado de RS (Kalsing et al., 2019). En este estudio, la ocurrencia del arroz maleza resistente fue de 56 %, 73 %, 68 %, 76 %, 100 % y 100 %, entre las temporadas 2006 al 2012, mientras que el efecto medio de los herbicidas en estas evaluaciones fue de 40 %, 44 %, 28 %, 18 %, 16 % y 6 %. Se destaca que en todos los estudios de monitoreo de arroz maleza en RS, se utilizaron muestreos dirigidos a la posible presencia de resistencia a herbicidas en cultivos de arroz. Los resultados encontrados evidenciaron la gran frecuencia de arroz maleza resistente a herbicidas, con un aumento de los niveles de resistencia a lo largo de las temporadas evaluadas. La gran frecuencia de ocurrencia indicó la necesidad de desarrollar procedimientos para el diagnóstico de la resistencia de arroz maleza a herbicidas, principalmente a través de métodos convencionales o expeditos que proporcionen la adecuada toma de decisiones en actividades de manejo del cultivo.

Principales causas asociadas con la distribución de la resistencia

En un estudio realizado durante las temporadas 2006 a 2012, se encontró una adopción muy baja de prácticas agronómicas para minimizar la evolución y diseminación de resistencia a herbicidas en arroz maleza, especialmente en las regiones de la depresión central y en la frontera sur (Cuadro 1). La región de la depresión central se caracteriza por pequeñas áreas cultivadas, suelo pesado y de drenaje deficiente. Estas características dificultan la rotación de cultivos, lo que perjudica directamente el control del arroz maleza. Históricamente, el ´roguing` se utilizaba en esta región para su control.

Sin embargo, y por desgracia, la frecuencia de utilización de esta práctica disminuyó con la adopción del arroz Clearfield. Actualmente, debido a la gran frecuencia de arroz maleza resistente, la

práctica del ´roguing` está retornando en muchas labranzas del estado RS, incluso en áreas de media a gran extensión.

El arroz maleza resistente a IMI fue detectado, en promedio, después de 2,7 cosechas después del inicio del uso de variedades de arroz Clearfield (CL). Estos resultados indicaron que el problema del arroz maleza resistente a IMI ocurrió más temprano que en cultivos de arroz en el sur de U.S.A. (Burgos et al., 2008) e Italia (Busconi et al., 2012), donde fue identificado después de 5 años de uso comercial de la tecnología CL. En el sur de U.S.A. la rotación de cultivos es ampliamente utilizada y la adopción de semillas certificadas es alta (Ziska et al., 2015). Esta situación es diferente en el estado de RS, donde sólo 36 % de los agricultores utiliza rotación de cultivos y el uso de semillas certificadas es baja (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estimación de la adopción de prácticas agronómicas aplicadas al control del arroz maleza en arroz de riego, en diferentes regiones productoras de arroz en Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Temporadas 2006 a 2012.

Región	(n)	Prácticas de manejo (%)			
		Semillas certificadas [1,2]	Control de escapes [1,3]	Maquinaria propia [4]	Rotación de cultivo
Depresión central	8	0b	75ab	88	0
Planicie costera interna	3	25ab	75ab	33	33
Planicie costera externa	6	83a	33bc	100	17
Frontera sur	12	13b	20c	92	42
Frontera oeste	8	25ab	75ab	88	63
Zona Sur	3	67ab	100a	67	33
Estado	40	36	63	78	31

Fuente: Kalsing et al., 2019. [1] Medias con la misma letra no difieren, test de Tukey, probabilidad de 5%. [2] Semilla certificada inspeccionadas por agencias reguladoras. [3] Control de escapes fue considerado como acciones de ´roguing`. [4] Maquinaria sólo usada en el campo del agricultor.

Identificación de plantas de arroz maleza resistentes

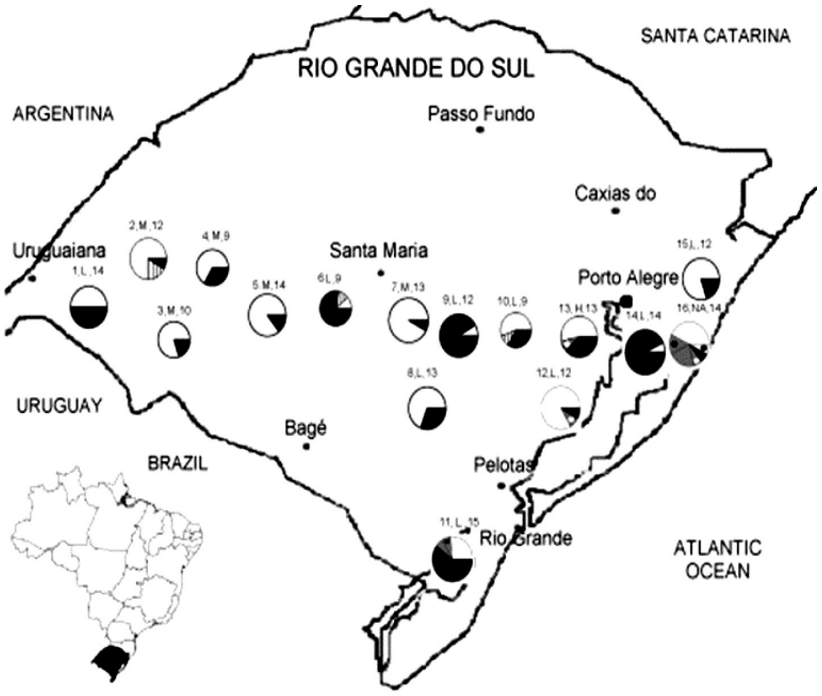
La rápida identificación de individuos resistentes es fundamental para el establecimiento de medidas de control más eficientes, destinadas a prevenir la distribución y a controlar individuos resistentes.

Los experimentos clásicos de identificación de resistencia relacionados con la aspersión del herbicida en el suelo o en las plantas demandan mucho tiempo y espacio para su ejecución, siendo onerosos y no expeditos; por lo que son poco apropiados para el análisis de un gran número de muestras. Enfoques más expeditos son necesarios para la identificación de biotipos resistentes. Es por ello que se realizaron bioensayos en tres etapas de desarrollo del ciclo del arroz: semillas, plántulas y macollas (Roso et al., 2010a).

Los estudios contemplaron el uso de SNP para detectar la mutación del gen *ALS* existente en poblaciones de arroz maleza e identificar molecularmente la resistencia (Roso et al., 2010b). Los resultados del estudio indicaron que la resistencia a los herbicidas IMI en las poblaciones de arroz maleza evaluadas se debe, en su mayoría, a la alteración del lugar de acción en la enzima ace-

tolactato sintasa (ALS), provocada por la mutación G654E. La elevada frecuencia de la mutación G654E en las poblaciones de arroz maleza resistentes, puede explicarse en función del gran uso de IRGA 422CL (variedad Clearfield de arroz utilizado en la época de realización del estudio) en las siembras de arroz, sugiriendo que el probable origen de resistencia se deba al flujo génico entre IRGA 422CL y el arroz maleza (Figura 2).

Estos procedimientos discriminaron de forma efectiva y rápida los individuos resistentes y susceptibles, siendo considerados técnicas expeditas para el diagnóstico de resistencia.

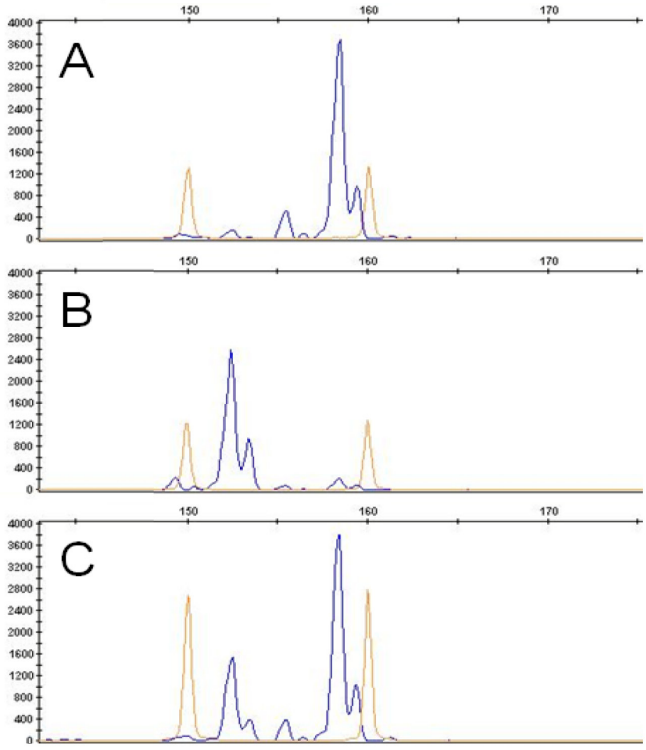


Fuente: Roso et al., 2010a.

Figura 2. Distribución de la frecuencia de alelos del gen *ALS* en arroz maleza. Los gráficos circulares indican el porcentaje de alelos ALS G654E ( ), S653D ( ), A122T ( ), G654E y A122T ( ), G654E y S653D ( ), G653E y A122T ( ), G654E, S653D y A122T ( ), y ninguno ( ) Identificados a través de los marcadores SNP.

Origen de la resistencia

Como se muestra en el párrafo anterior, las mutaciones presentes en los genes *ALS* de los biotipos de arroz maleza resistentes encontrados en RS fueron, en su mayoría, iguales a los encontrados en las variedades usadas de arroz resistente (Roso et al., 2010a). Sin embargo, esta resistencia también se puede originar en procesos independientes de selección. Se realizó un análisis de paternidad por exclusión (Goulart et al., 2012a) en individuos de arroz maleza resistentes a IMI colectados en la temporada 2007/08, basado en marcadores SSR (Figura 3) (Goulart, 2011; Goulart et al., 2012b). Se analizaron 176 individuos provenientes de 15 poblaciones de arroz maleza desde las variedades ´IRGA 417`, ´IRGA 422 CL`, ´Puitá INTA CL` y ´SATOR CL`, e híbridos obtenidos por cruzamientos artificiales entre estas variedades y cuatro biotipos de arroz maleza. El origen de la resistencia fue considerado como selección independiente cuando un individuo poseía solamente alelos típicos de arroz maleza y/o de la variedad IRGA 417. Se identificó que en el 98,9 % de los casos, la resistencia de arroz maleza a IMI se debía al flujo génico, y que en el 1,1 % la resistencia se debió a evolución independiente (Goulart et al., 2012b).



Fuente: Goulart, 2011.

Figura 3. Ejemplo de electroferograma del marcador microsatélite RM341, usando el procedimiento M13-tail. (A) Variedad ´IRGA 422 CL`, (B) arroz maleza, y (C) híbrido de la variedad ´IRGA 422 CL` y arroz maleza. Las curvas en color naranjo representan el marcador de tamaño ROX.

Variación de adaptación de los biotipos resistentes

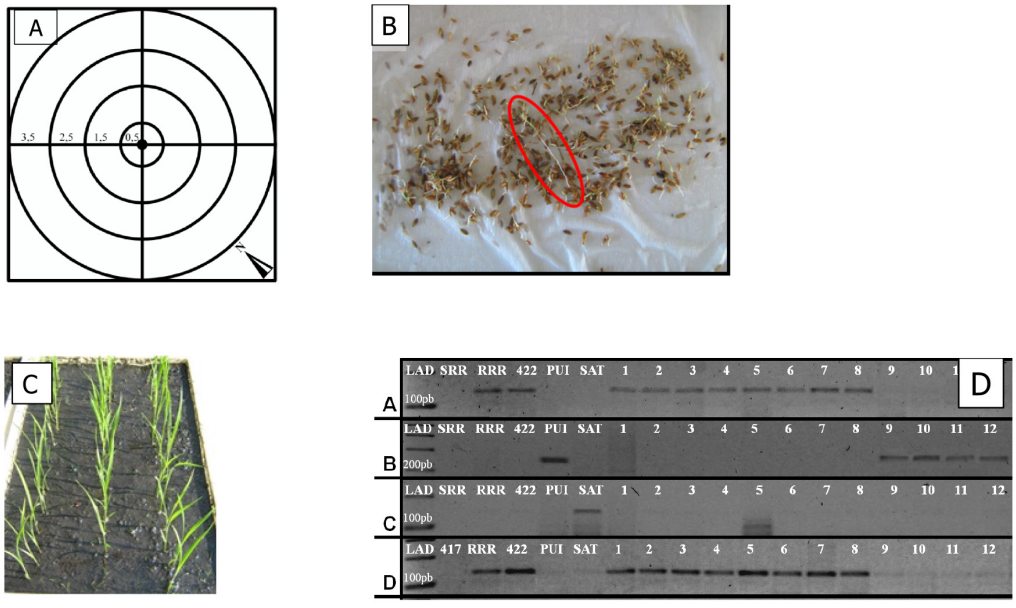
La variación de adaptación de individuos resistentes a herbicidas es importante, debido a la posibilidad de ocurrencia de alteraciones que resulten en la expansión o aumento de los perjuicios en las poblaciones que presentan esta característica. La resistencia a los inhibidores de *ALS* en arroz maleza puede tener otros efectos, además de la pérdida de eficiencia de control relacionados con la rápida germinación del biotipo resistente cuando es expuesto a baja temperatura, debido a la alteración de la reacción de la enzima (Dyer et al., 1993). Se realizaron estudios para evaluar si las alteraciones en el patrón de germinación de las variedades de arroces resistentes a herbicidas estaban relacionadas con las consecuencias de las mutaciones del gen *ALS*, o si obedecían al efecto de la variación ambiental de las localidades donde las semillas de estas variedades fueron producidas (Goulart et al., 2012a).

La variedad ´Puitá INTA-CL` germinó más rápidamente que ´IRGA 422 CL` e ´IRGA 417`, principalmente, en evaluaciones realizadas 100 a 170 h después de la incubación de las semillas a 20 °C. La distinta velocidad de germinación entre variedades de arroz puede proporcionar alternativas de manejo del arroz maleza resistente que se origine por el flujo de alelos a partir de variedades resistentes. En este caso, los individuos resultantes de una germinación más rápida pueden presentar un mayor problema, debido a la mayor competencia relacionada con la rápida emergencia y el rápido crecimiento inicial. Alternativamente, este resultado puede representar una característica desfavorable al establecimiento de estos individuos resistentes, debido a la eliminación con mayor eficiencia, por el uso de prácticas de control realizadas en períodos anteriores al establecimiento del cultivo.

Flujo génico entre arroz cultivado y arroz maleza

El análisis del flujo génico en relación a la presencia de arroz maleza resistente a herbicida tiene implicancia en la tasa de hibridación entre el arroz maleza y el arroz cultivado, y la migración de alelos de resistencia entre poblaciones. Se realizó un estudio para cuantificar la ocurrencia de flujo génico a partir de arroz maleza resistente y de las variedades de arroz con diferentes alelos del gen *ALS*, como una forma de estimar los riesgos asociados a las diferentes variedades de arroz resistentes a herbicidas IMI (Goulart, 2011). En este estudio se evaluaron, aproximadamente, 1 millón de semillas en experimentos de campo, utilizando la metodología de círculos concéntricos (Figura 4A).

La presencia de resistencia en estas semillas fue evaluada a través de los métodos de imbibición de semillas, métodos moleculares SSR, y aspersión de herbicida (Figuras 4B y 4D). La ocurrencia de flujo génico para el arroz maleza susceptible fue de 0,034 % y para la variedad IRGA 417 fue de 0,014 % (Goulart, 2011). Las variedades de arroz evaluadas y el biotipo de arroz maleza resistente actúan de forma similar como donantes de polen, resultando en un flujo génico promedio de 0,024 %. Estos resultados indican que la eliminación de ´escapes` de arroz malezas no controlados en cultivos de variedades resistentes a herbicidas IMI es fundamental para la eliminación del riesgo de migración del gen de resistencia al arroz maleza.



Fuente: Goulart, 2011.

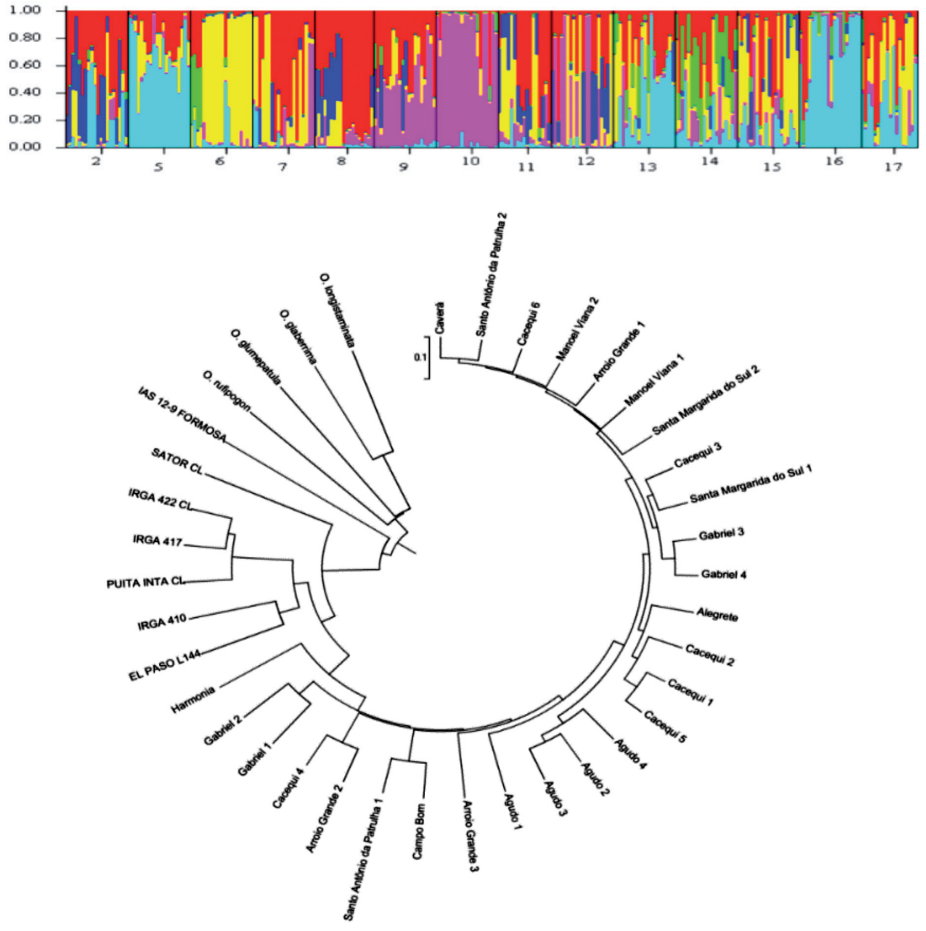
Figura 4. Representación de la identificación de plantas de arroz maleza resistentes a herbicidas imidazolinonas. (A) Diseño del experimento de campo, (B) evaluación de la imbibición de semillas, (C) crecimiento de plantas resistentes, (D) identificación de alelos de resistencia a través de marcadores moleculares SNP.

Diversas poblaciones de arroz maleza fueron identificadas como resistentes a herbicidas IMI en RS, tal como había sido descrito en los estudios anteriores. Se realizaron estudios de caracterización genética de poblaciones de arroz maleza de RS con sospechas de resistencia a los herbicidas IMI, como una forma de evaluar la estructura de estas poblaciones e identificar la ocurrencia de flujo génico de semillas entre diferentes localidades (Goulart, 2011). Los resultados demostraron que las poblaciones de arroz maleza de RS presentan una alta diversidad genética entre los individuos, aunque existe una considerable variación entre estas poblaciones en la media de los individuos. El análisis de la varianza molecular (AMOVA) indicó que la variación genética de las

534 accesiones de arroz maleza evaluadas, fue de 26 % entre poblaciones y de 74 % dentro de las poblaciones. Así, el valor del índice de fijación (F_{ST}) obtenido por AMOVA fue 0,26. Esto indica que la variabilidad genética en las poblaciones de arroz maleza está relacionada, sobre todo, a la diversidad dentro de cada población, en comparación con la variabilidad entre poblaciones. En poblaciones naturales de especies autógamas se espera una baja diversidad genética, debido al alto grado de homocigosis.

Sin embargo, al tratarse de poblaciones provenientes de áreas de cultivo, como el arroz maleza, la diversidad dentro de las poblaciones puede ser más elevada. Esto puede deberse a la selección impuesta por prácticas como el ´roguing` o a la migración de semillas entre poblaciones.

Los resultados observados confirman que el origen de resistencia a herbicidas en arroz maleza se debe, sobre todo, al flujo génico de semillas y polen. Sin embargo, también se identificaron poblaciones genéticamente aisladas. El sistema de análisis de la estructura de poblaciones utilizado en este estudio posibilitó la identificación del aislamiento genético y la intensidad de flujo génico en poblaciones de arroz maleza, como herramienta para el diagnóstico específico de poblaciones que presentaron aporte de semillas contaminadas de arroz maleza. Además, los resultados proporcionaron el diagnóstico de una mayor importancia del flujo génico, en detrimento de procesos independientes que dan origen a la resistencia a herbicidas en arroz maleza.



Fuente: Goulart, 2011.

Figura 5. (A) Representación de la variabilidad genética dentro y entre poblaciones de arroz rojo. (B) Dendrograma en base a marcadores moleculares SSR de poblaciones de arroz maleza, variedades y especies silvestres de arroz.

Importancia del manejo del cultivo en la sustentabilidad de dos métodos de control de arroz maleza

Los resultados presentados destacan la gran importancia de la sistematización de manejo del cultivo realizado por cada productor, en relación a la ocurrencia de flujo génico y resistencia a herbicidas en arroz maleza. En muchas áreas existen cultivos vecinos donde en un lado se tiene una labranza limpia de arroz maleza y otras malezas, mientras que en áreas adyacentes hay una alta infestación, resultando incluso en una inviabilidad productiva. Las evidencias presentadas indican que el sistema Clearfield, individualmente, no resuelve el problema de arroz maleza. Por ejemplo, en el estado de RS la gran herramienta para control de arroz maleza es el uso del sistema Clearfield y la rotación con soya.

Actualmente, un 90 % de las siembras en RS corresponden a cultivos Clearfield, y representan el área más importante del mundo con el uso de esta tecnología. Este mismo proceso se ha adoptado en los últimos años en el estado de Santa Catarina, Brasil. Los 15 años de utilización del sistema Clearfield en estas regiones han señalado que las prácticas de manejo del cultivo y de las malezas, como la adecuación de los sistemas de preparación del suelo y de riego, época de siembra, período de inicio del riego, rotación de cultivos, rotaciones, control de ´escapes` y utilización de semillas exentas de arroz maleza (certificadas), son y seguirán siendo herramientas altamente importantes en relación al control de arroz maleza.

Manejo de las malezas asociadas a la utilización de la tecnología Clearfield

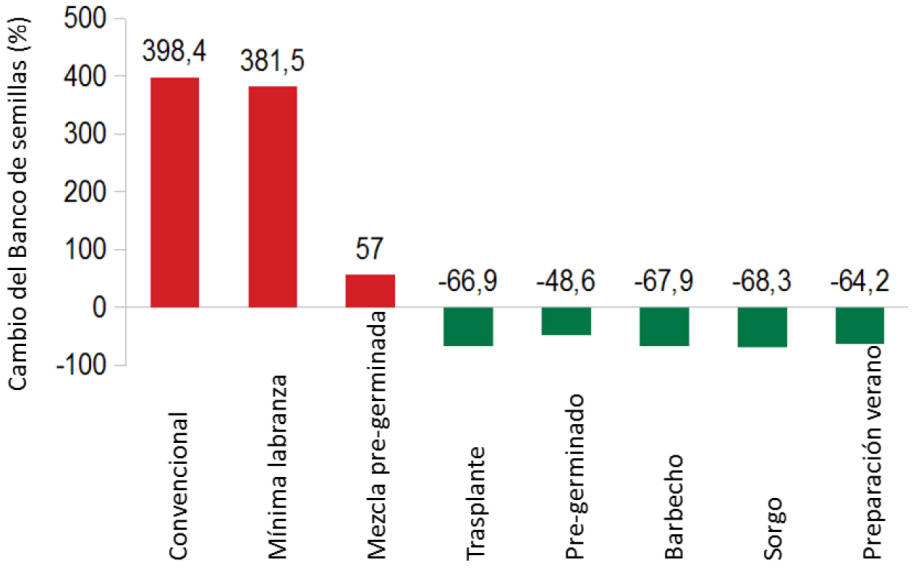
Sistemas de cultivo

El manejo o preparación del suelo consiste en un conjunto de operaciones realizadas para propiciar buenas condiciones de siembra, desarrollo de las plantas y la producción final. Entre los diversos objetivos para realizar la preparación del suelo, están la eliminación de malezas presentes en el área y el estímulo a la germinación de semillas presentes en el banco de semillas del suelo, para ayudar al éxito del establecimiento del arroz. Esta preparación del suelo puede ser inmediatamente antes de la siembra o temprano con barbecho en el verano, preparando la siembra de la siguiente cosecha (Figura 6). Normalmente se realiza una corrección del relieve a través de un rastraje (más tradicional) superficial del suelo o se procede a través de un proyecto de sistematización del suelo, con el uso de tecnologías más actuales utilizando satélites. Estos procedimientos contribuyen al mantenimiento de una lámina de agua homogénea que ayuda a reducir la emergencia de las malezas presentes en el cultivo del arroz de riego, entre ellas el arroz rojo.

Sistema convencional

En el sistema de cultivo convencional de preparación de suelo, el proceso se basa en la mecanización para alteraciones físicas, siendo necesario que esa preparación sea realizada con un contenido adecuado de agua, para evitar la realización de operaciones adicionales en el caso de suelos secos, o bien su deformación y formación de terrones en el caso de exceso hídrico.

La preparación convencional del suelo comienza en el otoño anterior a la siembra, con el desmanche de las taipas con lámina, arado o rejilla, siguiendo la preparación del suelo con arado de discos, de vertedera o incluso rejilla. La preparación normalmente finaliza con rastrajes de discos (rejilla niveladora). También es posible utilizar la rastra rotativa en la preparación convencional, lo que ayuda a la eliminación de los primeros flujos de arroz rojo antes de la siembra del arroz.



Fuente: Avila et al. (1998).

Figura 6. Cambios en el número de granos de arroz rojo (%) (*Oryza sativa*) en el banco de semillas del suelo, en respuesta a sistemas de utilización de áreas de tierras bajas.

Plantación directa / cultivo mínimo

Debido a la mayor desestructuración y pérdida por procesos erosivos ocasionados por la preparación convencional del suelo en áreas tropicales y subtropicales, los sistemas conservacionistas están siendo adaptados para el manejo del suelo en esas regiones edafoclimáticas. Aunque estos sistemas presentaron algunos obstáculos para el productor rural de arroz de Rio Grande do Sul, al final comprendieron que el problema de la infestación con arroz rojo sería cada vez más grave si es que no adoptaban los sistemas alternativos de manejo de esas malezas, lo que llevó a la amplia adopción, en un corto período, de los sistemas de siembra directa o de cultivo mínimo en ese estado brasileño.

La siembra directa y el cultivo mínimo adoptados en áreas de inundación cultivadas con arroz, difieren de aquellos adoptados en cultivos de tierras altas (soya y maíz, por ejemplo) en cuanto al objetivo inicial, tipo de suelo, compactación, diversificación de especies cultivadas y continuidad del sistema productivo.

Aunque en áreas de arroz de riego la siembra directa se adopta sólo en pequeñas áreas (previo rastraje del suelo 30 a 60 d antes de la siembra - cultivo mínimo), su adopción a las áreas de arroz contribuye a la reducción de la infestación de arroz rojo en el cultivo del arroz. Ambos sistemas incluyen una preparación ligera del suelo, en el otoño o el verano anterior (siembra directa) o en la primavera antes de la siembra (cultivo mínimo), donde algunos flujos de arroz rojo son estimulados por esas operaciones, con posterior eliminación química o mecánica.

Además de la eliminación química o mecánica de los flujos de emergencia del arroz rojo, la utilización del área para la ganadería proporciona diversos efectos que atenúan la ocurrencia del arroz rojo, como el pastoreo y el propio pisoteo de los animales en el área. Asociado a la presencia de los animales, la siembra en áreas de arroz de pastos de invierno como trébol, también ayuda a inhibir la presencia de arroz rojo.

Pre-germinado

El alto costo de producción y la baja rentabilidad del cultivo del arroz en el estado brasileño de Santa Catarina, hizo que los productores de arroz optaran por otro sistema de cultivo que tiene un manejo más laborioso, pero que posibilita el control cultural de buena parte de las malezas. Es innegable que el principal objetivo del uso del sistema de semillas pre-germinadas fue la supresión del arroz rojo, entre otras ventajas. El sistema de cultivo pre-germinado consiste, brevemente, en el establecimiento de tableros o cuadros de cultivo con cota cero, donde prácticamente toda la preparación del suelo y todo el cultivo del arroz se hace con la presencia de la lámina de agua, lo que constituye una barrera física al establecimiento de las malezas, siendo eficiente en la inhibición del arroz rojo.

Aunque el sistema de cultivo pre-germinado es eficiente en la inhibición de las malezas, en algunos casos se puede aplicar herbicidas con un adecuado manejo mecánico asociado al manejo del agua. En la mayoría de los casos, la asociación de este sistema con la aplicación de herbicidas, promueve los mejores resultados de control del arroz rojo.

Una práctica en desuso, debido al riesgo de contaminación de áreas, consistía en bajar la lámina de agua temporalmente, antes de sembrar el arroz, para estimular un flujo de emergencia del arroz rojo y otras malezas. Cuando estas plántulas estaban al estado de 2 a 3 hojas, el agua era restablecida y se aplicaba un herbicida que actuara sobre arroz rojo y otras malezas. Así, antecediendo la siembra del arroz con semillas pre-germinadas, el agua era drenada del cuadro, para posteriormente regar y sembrar. Esta práctica colaboraba en eliminar los primeros flujos de emergencia de las malezas.

En general, después de la siembra se espera que las plantas del arroz alcancen 3 a 4 hojas para, si es necesario, se usen los herbicidas en post-emergencia, en aplicación directa a la lámina de agua del cultivo.

Trasplante de arroz

En cuanto al manejo del arroz rojo, el sistema de trasplante de arroz se asemeja al cultivo pre-germinado, donde el área se mantiene con una lámina de agua, con la diferencia de que las semillas son germinadas, las plantas son establecidas en viveros y, posteriormente trasplantadas en el terreno inundado y preparado, ya sea de forma manual o con uso de máquinas trasplantadoras.

Además de la ventaja de eliminar el arroz rojo antes de la siembra y de su inhibición por la presencia de la lámina de agua, como también ocurre en el sistema pre-germinado, en el sistema de trasplante el tamaño de las plántulas inhibe, por competencia, las plantas de arroz rojo que puedan emerger entre hileras debido a su menor tamaño.

Rotación de cultivos

Las áreas de tierras bajas del sur de Brasil se cultivan con arroz en verano y, normalmente, se mantienen en barbecho el resto del año. Los residuos del cultivo ayudan en la inhibición de las malezas, pero ese efecto es más pronunciado cuando se cubre con alguna cobertura de invierno. En ese contexto, la rotación de cultivos ayuda en el manejo de las especies invasoras y también en la maximización de la cobertura vegetal en el área.

Los estudios muestran que el banco de semillas de malezas en áreas de arroz es menor, cuando se adoptan sistemas de rotación de cultivos con el arroz. Además, la rotación afecta también a la composición de la comunidad de las malezas. Aunque se conocen los beneficios de la rotación del arroz con leguminosas, en las tierras bajas el exceso hídrico es una gran limitante para su establecimiento, ya que las leguminosas como la soya no pueden soportar largos períodos de inundación.

Los cultivos de verano, como el maíz, el sorgo y la soya son opciones para la rotación de cultivos con el arroz de riego en las tierras bajas. La adaptabilidad del maíz es muy limitada en estos suelos, debi-

do a su mayor sensibilidad al exceso hídrico y a las restricciones impuestas por las características del suelo. El sorgo, por otro lado, se adapta mejor a las tierras bajas, al ser más tolerante al exceso hídrico, produciendo un gran volumen de biomasa; al asociarse esa cobertura vegetal (con herbicida) al pastoreo animal, se logran altos índices de eliminación del arroz rojo.

La soya, probablemente, es el cultivo más prometedor para la rotación con arroz de riego en las tierras bajas, ya que permite el manejo de las malezas del arroz, particularmente del arroz rojo, por la rotación de herbicidas durante su cultivo, y porque tiene garantizado su valor en el mercado. La viabilidad de la rotación arroz-soya depende de los resultados de investigación que generen prácticas de manejo del suelo, y del exceso hídrico en esas áreas, con el fin de hacerlas adecuadas al cultivo de la soya.

El éxito de la rotación arroz-soya en la inhibición de las malezas depende del sistema de cultivo y de la inclusión de los herbicidas indicados, pues cuando el manejo no está bien hecho, la ocurrencia de arroz rojo puede eventualmente agravarse.

Un estudio probó estrategias con herbicidas (pre y/o post-emergentes) aplicados a la soya, en el control de las malezas del arroz, como el arroz rojo, hualcacho y *U. plantaginea* (Figura 2). Entre otros resultados, el uso exclusivo de aplicación tardía del herbicida post-emergente Clethodim presentó bajos niveles de control de hualcacho y arroz rojo que fueron bien controlados por las aplicaciones de Glifosato en post-emergencia (sobre soya con tecnología Roundup Ready®). La aplicación única de S Metolachlor controló más del 80% de las tres especies de malezas evaluadas (Figura 7). Además de los tratamientos que utilizan la asociación del pre y de post-emergentes, evidenciaron un adecuado control de las especies estudiadas. Esto contribuye a afirmar que el uso de herbicidas pre-emergentes es importante para, al menos, retardar la aparición de biotipos de arroz rojo y de otras especies de malezas, con resistencia a los herbicidas post-emergentes.

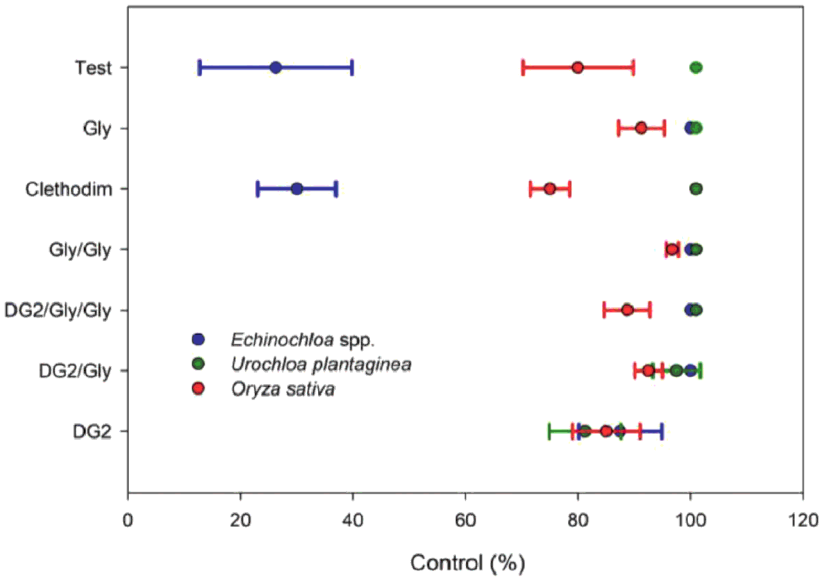


Figura 7. Control de hualcacho (*Echinochloa* spp.), papua (*Urochloa plantaginea*) y arroz rojo (*Oryza sativa*) con diferentes herbicidas, considerando la rotación arroz-soya. Gly = una aplicación en post-emergencia de glifosato 1.080 g i.a ha^{-1}; Clethodim = una aplicación post-emergencia de 144 g ha^{-1} de clethodim; Gly / Gly = dos aplicaciones en post-emergencia de glifosato 1.080 g i.a ha^{-1}; DG2 / Gli / Gli = una aplicación en pre-emergencia de S Metolachlor seguida por dos aplicaciones de glifosato; DG2 / Gli = una aplicación en pre-emergencia de S Metolachlor seguida de una aplicación de glifosato; DG2 = una aplicación en pre-emergencia de S Metolachlor. Tratamiento comparado con el intervalo de confianza del promedio al 95 %.

Manejo del agua

El manejo del agua es una importante herramienta para el control del arroz rojo y de otras malezas, pues sirve como barrera al inicio de la germinación, tanto en el sistema convencional de cultivo como en la siembra directa, cultivo mínimo, pre-germinado o trasplante de plántulas.

En el sistema de cultivo convencional y en la siembra directa, la entrada de agua en la labranza debe ocurrir lo más rápido posible después de la emergencia del arroz y la aplicación de los herbicidas post-emergentes, y debe ser mantenida durante todo el ciclo del cultivo para evitar nuevos flujos de emergencia de arroz rojo. El efecto del sistema de riego de la labranza sobre la infestación de arroz rojo se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Efecto del manejo de agua de riego sobre la infestación de arroz rojo en un cultivo comercial de arroz.

	Arroz rojo	
Manejo de agua	Plantas m^{-2}	Panículas m^{-2}
Riego tardío	296	380
Riego intermitente	38	123
Riego contínuo	11	59

Fuente: Noldin, 1988.

Arranque

El ´rouging` (arranque) es una técnica que consiste en la remoción manual de las plantas o panículas de arroz rojo desde el cultivo, basándose en las diferencias morfológicas entre las plantas. Es una práctica complementaria importante que es utilizada por pequeños productores, principalmente en la región Central del Estado de Rio Grande do Sul, pero con buena aceptación por productores, incluso en áreas de mayor cultivo. A cada cosecha se le pueden realizar varios ´roguing`; sin embargo, con la aparición de plantas de arroz rojo similares morfológicamente a las plantas de arroz cultivado, esta práctica está teniendo mayores dificultades.

Barra química

El control del arroz rojo, utilizando un herbicida sistémico de acción total a través de la ´barra química`, es una técnica desarrollada para la eliminación de las plantas de arroz rojo existentes en la siembra después de la emergencia del arroz. Para ello, es fundamental la diferencia de estatura entre las plantas de arroz cultivado y del arroz rojo. La técnica consiste en empapar la cuerda de la barra con el herbicida y desplazarse en el cultivo, haciendo que las plantas de arroz rojo entren en contacto con el producto. La operación tiene por objeto evitar la re-infestación del área, y puede ser una opción interesante para pequeñas propiedades. Este método, además de ser arduo para el productor, presenta algunas desventajas como: no alcanza el arroz rojo producto de la hibridación con arroz cultivado (menor altura), haciendo que ocurra una presión de selección de plantas más bajas, lo que aumenta la importancia de este tipo de arroz rojo en la población.

Barbecho

El barbecho es utilizado por los productores de arroz de riego que tienen más área disponible que la cultivada, para mantener el arroz rojo en niveles tolerables. Como se advierte en la Figura

1, Avila et al. (1998) mostraron que el barbecho reduce en torno al 60 % el número de semillas de arroz rojo en el banco del suelo, en comparación con suelo removido. El barbecho de un sólo año (Petrini et al., 1998) no es suficiente para reducir la aparición de arroz rojo, indicándose por lo menos dos años de descanso por área.

Existe la necesidad de mayores evaluaciones para esclarecer el efecto del barbecho del área, integrado o no con la ganadería, sobre la reducción de la presencia del arroz rojo. Algunos resultados indican que el pisoteo animal no tiene efecto sobre la pérdida de viabilidad de las semillas de arroz rojo en el banco del suelo, pero el pastoreo evita el crecimiento y la producción de semillas de las plantas, lo que es beneficioso al sistema productivo (Gomes y Magalhães, 2004).

Preparación anticipada

La preparación temprana del suelo, poco después de la cosecha del arroz, favorecería la descomposición de la paja, además de corregir ondulaciones producidas por la cosechadora y otras máquinas utilizadas en la cosecha del arroz. También facilitaría las labores de preparación de suelo anteriores a la fecha de siembra de la siguiente temporada (SOSBAI, 2018).

Además de estas funciones, la preparación temprana del suelo también facilita el manejo del banco de semillas de arroz rojo. En este sentido, Masoni et al. (2013) evaluaron diversos sistemas de preparación temprana del suelo como el uso de lámina de agua permanente, incorporación de la paja en suelo seco o con agua y uso de rodillo-cuchillo., Estos autores concluyeron que el tratamiento más eficiente en la reducción del banco de semillas del arroz rojo fue la preparación después de la cosecha con suelo inundado, pues actúa en la reducción de la dormancia, aumento de semillas inviables y estímulo a la germinación. El rodillo, por ejemplo, permitió incorporar superficialmente la paja, actuando sobre el quiebre de la dormancia, la inviabilidad y el estímulo a la germinación de las semillas de arroz rojo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentaje de semillas de arroz rojo en dormancia en la capa de 0-10 cm de profundidad, bajo diferentes manejos de post-cosecha del área, 120 d después de la aplicación de los tratamientos.

Tratamiento	Semillas viables (%)
Lámina de agua	46 a
Preparación pos-cosecha con suelo seco	29 b
Preparación post-cosecha con suelo inundado	29 b
Preparación de suelo seco en julio	39 ab
Preparación post-cosecha con suelo inundado + preparación de suelo seco en julio	37 ab
Preparación post-cosecha en julio con suelo seco	32 b
Sin preparación del suelo	40 ab

Fuente: Massoni et al., 2013. Las medias seguidas por la misma letra no difieren por la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad.

Punto de aguja

Para cultivos de arroz con resistencia de arroz rojo u otras especies de malezas a los herbicidas inhibidores de la enzima ALS, una importante estrategia es la aplicación de glifosato, sólo o en

mezcla con clomazone o pendimetalina, en estado llamado ´punto de aguja`. Esto asegurará la emergencia del cultivo de arroz en áreas sin infestación de esas especies. La etapa de ´punto de aguja` se considera como el momento inmediatamente anterior a la emergencia del arroz, normalmente indicado por la presencia de unas pocas plántulas de arroz ya germinadas. El herbicida debe aplicarse el mismo día en que el ´punto de aguja` es constatado (Andres et al., 2013).

Manejo del suelo entre temporadas

La literatura indica que después de la cosecha del arroz el suelo no debe ser removido, pues las semillas de arroz rojo, localizadas hasta 5 cm de profundidad en el suelo, pierden la viabilidad en menos de 17 meses, mientras que en aquellas semillas ubicadas a 25 cm de profundidad, algunos biotipos son capaces de mantener la viabilidad por más de 24 meses (Gomes y Magalhães Jr., 2004). Petrini et al. (1998) obtuvieron una reducción del 74 % en el banco de semillas de arroz rojo en los primeros 5 cm de suelo, en el área bajo barbecho en el período de mayo a octubre. Esto ilustra que el hecho de no mover el suelo después de la cosecha, por sí solo, constituye una alternativa para el manejo del arroz rojo.

Por otro lado, un gran número de productores de arroz de riego en Rio Grande do Sul incorporan el rastrojo del arroz después de la cosecha, lo que estimula la emergencia de arroz rojo, exigiendo una operación adicional de control que puede ser una nueva preparación del suelo, o la aplicación de herbicida de acción total.

Cuando el área es utilizada para alimentación animal en este período, se recomienda aumentar el número de animales para evitar la producción de propágulos y, en caso de que los bovinos consuman estas plantas con granos, lo recomendado es que el transporte de animales entre áreas sea controlado. Estudios recientes con alimentación animal con granos de pasto rojo, evidencian la necesidad de un período de cuarentena superior a 6 d (SOSBAI, 2018; Viero et al., 2018).

Retrospectiva de la tecnología de arroz tolerante a los herbicidas inhibidores de la enzima ALS en uso en las labranzas de arroz del sur de Brasil

El uso de plantas mutadas (no OMG) con el gen de tolerancia a herbicidas no selectivos al arroz, es considerado una tecnología innovadora en el control de malezas que facilitó el control selectivo de arroz rojo (Burgos et al., 2008). En el caso de los cultivos de arroz, en el sur de Brasil (Merotto et al., 2016) se observó un aumento de 2,5 t ha^{-1} en el rendimiento de granos de arroz. El uso de la tecnología Clearfield® (CL) en el sur de Brasil comenzó en 2002. Diez años después, más del 60 % del área estaba utilizando esa tecnología para el manejo del arroz rojo, con niveles de control superiores al 95 % (Andres et al., 2013).

Actualmente, los herbicidas registrados en esta tecnología corresponden a las mezclas formuladas imazethapyr + imazapic e imazapyr + imazapic. Aisladamente, el herbicida imazethapyr ha sido también adoptado por los productores. El registro de los productos, indica una aplicación en pre-emergencia, seguida de una en post-emergencia, previo al riego.

Esta tecnología proporcionó beneficios inmediatos en cuanto a la eficiencia y facilidad de control del arroz rojo. Debido, principalmente, a fallas en la aplicación de la tecnología, fuera de las indicaciones técnicas, surgieron biotipos de arroz-rojo resistentes a los inhibidores de la enzima ALS, apenas cuatro años después de la introducción de la tecnología en el cultivo del arroz de la región, que acabaron dispersándose hacia otras regiones del Estado de Rio Grande do Sul.

Los productores de arroz y quienes proporcionan la asistencia técnica están tomando medidas adicionales para el manejo de este problema, con rotación de cultivos y diversos mecanismos de acción de los herbicidas, para reducir las pérdidas de productividad ocasionadas por el arroz rojo y otras malezas resistentes a herbicidas en los cultivos de arroz del sur de Brasil. Los estudios

muestran índices de control eficientes de las malezas asociados al uso de herbicidas de diferentes mecanismos de acción (Cuadro 4).

Cuadro 4. Control de arroz rojo en arroz de riego a pre-cosecha y productividad de granos (cv. BRS A701 CL). Embrapa, Capão do Leão, RS, 2018.

Tratamientos		Control pre-cosecha (%)	Productividad (kg ha^{-1})
PRE (g ha^{-1})	POS (g ha^{-1})		
Testigo s/ control		0	2102,1 B[2]
Clomazone, 252	Propanil, 1800 + imazethapyr, 159	100,0 [ns]	9609,4 A
Clomazone, 252	Propanil, 1800 + imazapyr+ imazapic, 73,5+24,5	99,5	9158,1 A
Clomazone, 252	Propanil, 1800 + imazethapyr, 159 + clomazone, 252	100,0	10275,9 A
Clomazone, 252 + imazethapyr, 159	Propanil, 1800+ imazethapyr, 159	100,0	9805,5 A
Clomazone, 252 + imazapyr+ imazapic, 73,5+24,5	Propanil, 1800 + imazapyr+ imazapic, 73,5+24,5	99,8	9836,7 A
Coeficiente de variación (%)		1	15,30

[1] Aplicación punto de aguja (adicional glifosato, 1080 g i.a ha^{-1}).

[2] Letras distintas mayúsculas, por columna difieren entre sí, test de Duncan ($p< 0,05$).

[ns] No significativo, en la columna, cuando se compararon los tratamientos herbicidas, test de Duncan ($p< 0,05$).

Referencias

Andres, A., Theisen, G., Concenço, G., et al. 2013. Weed resistance to herbicides in rice fields in Southern Brazil. In: Price, A.J., Kelton, J.A. (eds.) Herbicides. IntechOpen. doi:10.5772/55947.

Avila, L.A., Marchezan, E., Coradini, J.Z., et al. 1998. Controle do arroz-daninho: sistemas de cultivo de arroz irrigado, rotação de culturas, pousio do solo e preparo de verão. p. 12-16. In Marchezan, E. (ed.) Sistema várzea: propostas de manejo. Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC), Santa Maria, Río Grande do Sul, Brasil.

Burgos, N.R., Korsworthy, J.K., Scott, R.C., et al. 2008. Red rice (*Oryza sativa*) status after 5 years of imidazolinone-resistant rice technology in Arkansas. Weed Technol. 22:200-208.

Busconi, M., Rossi, D., Lorenzoni, C., et al. 2012. Spread of herbicide-resistant weedy rice (red rice, *Oryza sativa* L.) after 5 years of Clearfield rice cultivation in Italy. Plant Biol. 14:751-759.

Dyer, W.E., Chee, P.W., Fay, P.K. 1993. Rapid germination of sulfonylurea-resistant *Kochia scoparia* L. accessions is associated with elevated seed levels of branched chain amino acids. Weed Sci. 41:18-22.

Gomes, A.S., Magalhães Jr., A.M. 2004. Arroz irrigado no sul do Brasil. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, Brasil.

Goulart, I.C.G.R. 2011. Fluxo gênico e variação adaptativa de arroz daninho (*Oryza sativa* L.) resistente a os herbicidas imidazolinonas. Dissertação de mestrado (PPG Fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Goulart, I.C.G.R., Matzenbacher, F.O., Merotto, Jr., A. 2012a. Differential germination pattern of rice cultivars resistant to imidazolinone herbicides carrying different acetolactate synthase gene mutations. Weed Res. 52:224-232.

Goulart, I.C.G.R., Pacheco, M.T., Nunes, A.L., et al. 2012b. Identification of origin and analysis of population structure of field-selected imidazolinone-herbicide resistant red rice (*Oryza sativa*). Euphytica 187:437-447.

IRGA. 2002. O arroz na conjuntura. Boletim do IRGA 1(1):1-4.

Kalsing, A., Goulart, I., Mariot C., et al. 2019. Spatial and temporal evolution of imidazolinone-resistant red rice in "Clearfield" rice cultivations. Pesq. Agropec. Bras., Brasília 54:e00215.

Massoni, P.F.S., Marchesan, E., Grohs, M., et al. 2013. Influência de manejo pós-colheita do arroz irrigado sobre o banco de sementes de arroz-vermelho. Planta Daninha 31:89-98.

Merotto Jr.A., Goulart, I.C.G.R., Nunes, A.L., et al. 2016. Evolutionary and social consequences of introgression of nontransgenic herbicide resistance from rice to weedy rice in Brazil. Evol. Appl. 9:837-846.

Noldin, J.A. 1988. Controle de arroz-daninho no sistema de semeadura em solo inundado. Lavoura Arrozeira 41(377):11-13.

Petrini, J.A., Franco, D.F., Tavares, W. 1998. Germinação e viabilidade de sementes de arroz-daninho (*Oryza sativa*) em solo cultivado com arroz irrigado no sistema convencional. p. 373-376. In Reunião Nacional de Pesquisa de Arroz, Goiânia, Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijao (CNPAF), Goiânia, Goiás, Brasil.

Roso, A.C., Merotto, Jr.A., Delatorre, C.A. 2010b. Bioensaios para diagnóstico da resistência aos herbicidas imidazolinonas em arroz. Planta Daninha 28:411-419.

Roso, A.C., Merotto, Jr.A., Delatorre, C.A., et al. 2010a. Regional scale distribution of imidazolinone herbicide-resistant alleles in red rice (*Oryza sativa* L.) determined through SNP markers. Field Crops Res. 119:175-182.

Roso, A.C., Merotto, Jr.A., Delatorre, C.A. 2010b. Bioensaios para diagnóstico da resistência aos herbicidas imidazolinonas em arroz. Planta Daninha 28:411-419.

SOSBAI. 2018. Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Sociedade Sul-Brasileira do Arroz Irrigado (SOSBAI), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Viero, J.L.C., Schaedler, C.E., Azevedo, E.B de., et al. 2018. Endozoochorous dispersal of seeds of weedy rice (*Oryza sativa* L.*)* and barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli* L.) by cattle. Ciência Rural 48(8):1-6.

Ziska, L., Gealy, D.R., Burgos, R., et al. 2015. Weedy (red) rice: An emerging constraint to global rice production. Adv. Agron. 129:181-228.

Capítulo 19. Cultivo del arroz en Italia y Europa

Francesco Vidotto, Silvia Fogliatto

Producción de arroz en Europa en el contexto internacional

En la Unión Europea (UE), el arroz se cultiva exclusivamente con fines comerciales. Su importancia está bastante limitada, en términos de superficie cultivada y producción total, en comparación con otros cultivos. La incidencia del arroz de la UE es aún menor a nivel internacional. En 2014 sólo representó alrededor del 0,4 % del área arrocera mundial y 0,64 % de la producción total, mientras que los mayores productores se concentran principalmente en Asia, China, India e Indonesia, todos los cuales representan alrededor del 50 % tanto del área como de la producción de todo el mundo (FAO, 2018).

Áreas arroceras en Europa y sistemas de producción

El arroz se cultiva en la UE en aproximadamente 446.000 ha, con un rendimiento promedio cercano a las 6,8 t ha^{-1}. Las principales zonas arroceras europeas son el valle del Po en Italia, la Camarga (sur de Francia), varias áreas en España (delta del Ebro, área alrededor de Valencia, Sevilla, Badajoz y Zaragoza), el valle del Tejo y la región del Mondego en Portugal, y los alrededores de Thessaloniki en Grecia (Ferrero, 2007). Alrededor del 50 % del área total se encuentra en el valle del Po. Se puede estimar que cerca del 70 % del área arrocera se cultiva con variedades *japonica*, mientras que el 30% restante con variedades *japonica* similares a *indica* (Kraehmer et al., 2017). Éstos tienen granos alargados, pero genéticamente pertenecen al grupo *japonica*.

El arroz se cultiva principalmente como monocultivo, comúnmente en suelos de textura fina y mal drenados, con rasgos muy variables, como el pH (4,5 a 8,5), contenido promedio de materia orgánica de 2 % (0,5 % a 10 %) y contenido de sal que pueden ser bastante importantes en las zonas costeras (por ejemplo, Camarga en Francia, delta del Ebro en España, y delta del Po en Italia).

A menudo se produce en áreas donde las condiciones ecológicas no permiten otros cultivos. Por ejemplo, en Valencia (España) el cultivo de arroz está situado en suelos pantanosos de una laguna costera. En otras tierras de origen autóctono más cercanas a los Alpes (conocidas en Italia como ´Baragge`), que solían ser boscosas o sin perturbaciones, ahora se siembran con arroz, ya que estos suelos son compactos, con bajo contenido de materia orgánica y baja fertilidad. El área del arroz en Europa tiene un clima templado-continental que sólo permite una temporada de crecimiento por año.

A pesar de la gran variabilidad de las condiciones ambientales en que se cultiva el arroz en la UE, todo el arroz europeo se cultiva exclusivamente bajo riego (Garrity et al., 1986; Ferrero y Vidotto, 2010).

Si bien la inundación de malezas tiene un efecto significativo en la presión que ejercen, disminuyendo su presencia, este sistema se adopta, principalmente, con el objetivo de reducir las fluctuaciones de temperatura. El agua proviene de ríos, lagos y manantiales, mientras que sólo en algunos casos las aguas se extraen de los acuíferos.

Los campos de arroz se organizan generalmente en sistemas de 4 a 7 campos adyacentes, en los que el agua fluye desde la parte superior a la cuenca inferior, lo que se denomina ´sistema de flujo continuo`.

El cultivo se establece principalmente a través de siembra directa en seco. Históricamente, el trasplante se introdujo en Italia desde España, a principios de la década de 1910, y duró hasta la década de 1950 cuando se introdujeron los primeros herbicidas (Ferrero y Vidotto, 2010).

En la actualidad, alrededor del 70 % del área de arroz se gestiona adoptando inundaciones permanentes. En este caso, el arroz se siembra (como semilla remojada) en campos inundados. Al poco tiempo, los campos se secan durante algunos días para promover la formación de raíces y el establecimiento de plántulas. Después de eso, se mantienen continuamente inundados hasta, aproximadamente, 1 mes antes de la cosecha, con la excepción de los períodos cortos en los que se realizan tratamientos con herbicidas y fertilizantes de cobertura. El 30 % restante del área de arroz corresponde a siembra directa (en seco), donde los campos se inundan a partir de la etapa de macolla en adelante.

Cultivo del arroz en Italia

En 2017, la superficie total arrocera en Italia cubría un poco más de 229.000 ha, con un rendimiento promedio de 6,8 t ha^{-1}. El número de variedades cultivadas es bastante significativo, ya que en 2015 se sembraron 140 variedades, aunque sólo 7 ocupaban más de 10.000 ha cada una (Cuadro 1).

La siembra directa en campos secos se adopta en aproximadamente 38 % del área total de arroz, porcentaje que ha estado aumentando en los últimos años, lo que se relaciona con el aumento del cultivo de variedades tolerantes a imidazolinonas (IMI) (ENR, 2015b).

Cuadro 1. Superficie total, rendimiento promedio, número de variedades y área con variedades tolerantes a imidazolinonas (IMI) en Italia.

Superficie total (ha)	Rendimiento promedio (t ha^{-1})	Variedades (N°)	Área con variedades tolerantes a IMI
229.546 (2017)	6,8 (2016)	140 (7 > 10.000 ha cada una) (2015)	38 % (2017)

Fuente: ENR, 2015a; 2016.

En los últimos 30 años el número de predios se ha reducido en más de 50 % (Cuadro 2). En contraste, el tamaño promedio aumentó de 21 a 54 ha, valor bastante alto en comparación con el tamaño promedio de las granjas italianas, un poco inferiores a las 8 ha (ISTAT, 2018).

Cuadro 2. Evolución del número de agricultores arroceros y tamaño promedio de granjas arroceras en Italia desde 1980 a 2015.

	1980	2011	2015
Agricultores arroceros	8.800	4.300	4.200
Área promedio de granja (ha)	21	52	54
Área/trabajador (proporción)	-	-	45 a 60 ha/trabajador

Fuente: ISTAT, 2018.

El arroz en Italia es altamente mecanizado y cada trabajador puede administrar 45 a 60 ha y más. El alto número de variedades se debe a muchas razones. Una de ellas responde al hecho de que el mercado tradicionalmente requiere variedades pertenecientes a diferentes grupos comerciales de la UE, cada uno de los cuales tiene características de grano diferentes. Si consideramos la to-

talidad de la producción cosechada, los grupos varietales más importantes son las variedades de grano redondo y medio más largo A (Cuadro 3). Cada granja, por lo general cultiva al menos 2 a 3 variedades pertenecientes a diferentes grupos, para aumentar la resiliencia económica frente a las fluctuaciones del mercado.

Cuadro 3. Clasificación de granos de arroz adoptada en la Unión Europea, basada en la longitud de los granos y en la relación largo/ancho y volumen cosechado en Italia. Temporada 2015-2016.

Tipo de grano	Largo (mm)	Largo/ancho	Cosecha 2015/16 (t)
Redondo (*japonica*)	< 5,2	< 2	405.000
Medio (*japonica*)	5,2-6,0	< 3	830.300
Largo A (*japonica*)	> 6,0	2-3	
Largo B (*indica*-like)	> 6,0	> 3	252.000

Variedades tolerantes a IMI

Las variedades tolerantes a IMI se comercializaron, por primera vez en la UE, en 2006 en Italia, identificada como la variedad ´CL161` y con el nombre comercial ´Libero` (libre), correspondiente a una mutación en el codón 653 del gen *ALS* (sustitución de serina con asparagina). Después de su introducción, las variedades tolerantes a IMI ganaron gran interés entre los agricultores, principalmente porque proporcionaron una herramienta eficiente para controlar selectivamente el arroz rojo en post-emergencia (Scarabel et al., 2012). En particular, esta tecnología incluye el uso de variedades tolerantes a IMI, junto con la aplicación de una formulación comercial que contiene imazamox, específicamente registrada para este tipo de uso. ´Libero`, variedad tolerante a IMI, tenía algunas características desfavorables, ya que el ciclo de cultivo era muy largo en comparación con otras variedades, aunque inicialmente se adoptó en campos altamente infestados con arroz rojo. Luego se desarrollaron otras variedades tolerantes a IMI, con rasgos agronómicos más favorables. En aproximadamente 7 años, el área cultivada con estas variedades aumentó hasta aproximadamente un 37 % del área de arroz italiano (ENR, 2017).

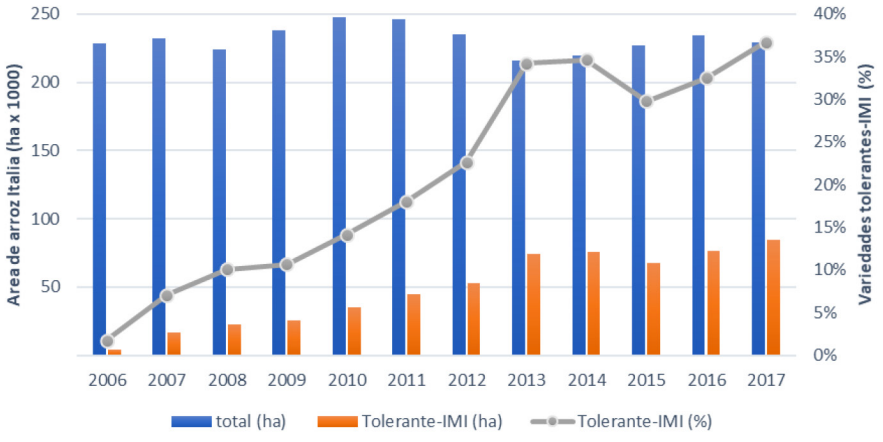


Figura 1. Superficie total del área de arroz en Italia, variedades tolerantes a imidazolinonas (IMI) y proporción convencional/IMI, desde su introducción en 2006 al 2017 (a partir de datos disponibles en https://www.enterisi.it/).

Las variedades tolerantes a IMI disponibles en Italia pertenecen a todos los grupos de variedades cultivadas actualmente (Cuadro 3). Sin embargo, entre los diferentes grupos varietales, la proporción de variedades tolerantes a IMI es particularmente alta para los grupos Largo B y redondo con 77 % y 43 %, respectivamente. La importancia de estas variedades es, en contraste, bastante baja en el caso de las variedades con tipos de grano Largo A (para hacer risotto) y Medio, con 12 y 7 %, respectivamente (Figura 2).

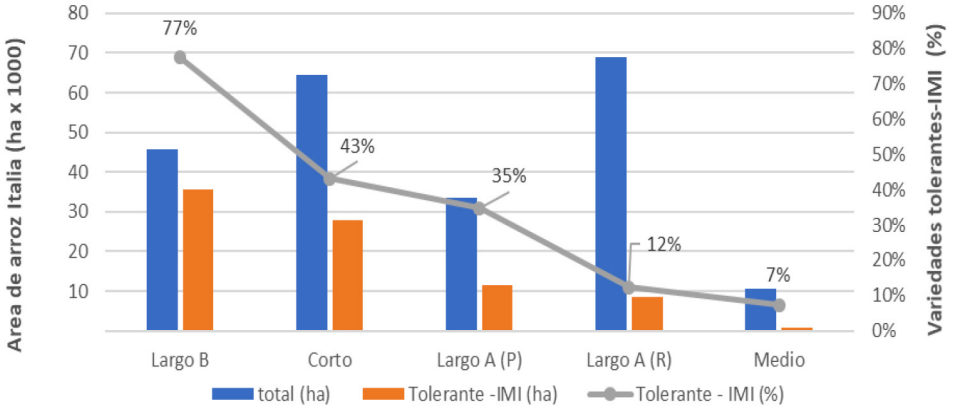


Figura 2. Superficie del área arrocera de Italia y variedades tolerantes a imidazolinonas (IMI), agrupadas por tipo de grano, porcentaje de IMI. Largo A (P) y Largo A (R) se refieren a las variedades comercializadas principalmente para ´parbolizado` o para hacer ´risotto`, respectivamente.

En el resto de Europa la adopción de estas variedades es generalmente menor. Se estima que las variedades tolerantes a IMI se cultivan en torno al 13 % del área total de arroz (14.000 ha de 109.300 ha) en España, 10% (3.000 ha de 30.000 ha) en Grecia y 25 % (7.200 ha de 28.600 ha) en Portugal (L. Quaglini, comunicación personal).

El uso combinado de variedades tolerantes y herbicidas IMI, está patentado por BASF bajo la marca registrada ´Clearfield Technology`. En Italia se solicita a los agricultores que quieran adoptar esta tecnología que acepten y sigan estrictamente las pautas de administración emitidas por BASF, que incluyen los siguientes requisitos: (1) las variedades Clearfield deben rotarse con arroz convencional al menos cada 2 años de cultivo consecutivo; (2) el imazamox debe aplicarse dos veces, cada vez a 35 g i.a. ha^{-1}, con un intervalo de 2 a 3 semanas entre los tratamientos; y (3) la eficacia del tratamiento con herbicida debe controlarse cuidadosamente y los ´brotes` de arroz rojo deben eliminarse por completo.

Principales malezas en arroz

La información histórica sobre las malezas en el arroz en Italia se remonta a la década de 1800, cuando Giovanni Biroli (Biroli, 1807) informó como uno de los mayores problemas de malezas a *Cyperus longus* y *Scirpus mucronatus* y los hualcachos, particularmente *Echinochloa crus-galli* (Vidotto y Ferrero, 2013). A principios de la década de 1900, Jacometti (1912) enumeró más de 100 especies. Esta cifra se mantuvo constante hasta mediados de la década de 1950, cuando comenzó la difusión de nuevas técnicas de cultivo de arroz. En particular, el cambio del trasplante a la siembra directa y el abandono del control manual de las malezas e introducción de variedades de arroz de baja altura, provocaron el empeoramiento de las infestaciones de malezas. El primer uso generalizado de herbicidas estaba dirigido a controlar las ciperáceas y las especies de *Alismataceae*. Esto resultó en un mayor dominio de *Echinochloa* y otras gramíneas.

Hoy en día, el ecosistema del campo de arroz italiano es notablemente complejo e incluye especies que compiten con el arroz en los cuadros y también las presentes en otras áreas, como diques, zanjas, canales y caminos. Estas malezas pueden ser acuáticas o adaptadas a los ambientes acuáticos y secos, y se caracterizan por rasgos morfo-fisiológicos específicos. Las plantas C4 se encuentran principalmente en suelos no inundados, mientras que las especies C3 están frecuentemente presentes en suelos sumergidos. Todas estas plantas han desarrollado la capacidad de adaptarse a un entorno que está inundado durante aproximadamente la mitad del año y seca para el descanso (Ferrero y Vidotto, 2007). Las malezas sobreviven al período seco mediante propágulos de semillas (plantas anuales) o estructuras vegetativas como tubérculos (*Bolboschoenus maritimus* [L.] Pallay) y rizomas (*Tipha* spp.). La disponibilidad de agua y la alta temperatura durante el período de cultivo del arroz también ha permitido la proliferación de especies tropicales (*Paspalum distichum* L., *Cyperus communis*).

Basados en las prácticas adoptadas para su control, las principales especies de malezas de los campos de arroz europeos se pueden agrupar de la siguiente manera (Ferrero et al., 2002): 1) *Echinochloa* spp.; 2) especies de *Heteranthera*; 3) especies de *Alisma* y *Cyperaceae* (juncias); 4) varios biotipos de arroz maleza; 5) malezas de los campos sembrados en seco; y 6) otras malezas de menor importancia que normalmente no están sujetas a intervenciones específicas.

A nivel de la UE, las malezas de arroz más importantes son básicamente las mismas que se describen para Italia, con algunas pequeñas diferencias y variabilidades entre diferentes regiones dentro de un mismo país. En general, *Cyperus* spp., *Echinochloa* spp., *Heteranthera* spp. y *Oryza sativa* (arroz rojo) son los grupos que representan una amenaza en los principales países productores de arroz de la UE (Cuadro 4) (Kraehmer et al., 2016; 2017).

Cuadro 4. Importancia estimada de frecuencia de los géneros de maleza en campos de arroz de algunos países europeos.

Genus	Francia	Grecia	Italia	Portugal	España
Alisma	xx	xx	xxx	xx	xx
Bidens	xx	-	xx	x	-
Bolboschoenus	xxx	-	xxx	-	xxx
Butomus	x	x	x	-	-
Cyperus	xxx	xxx	xx	xxx	xxx
Digitaria	x	x	xx	x	-
Echinochloa	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Heteranthera	xxx	xx	xxx	xxx	xxx
Leersia	xxx	xxx	xx	xxx	xx
Leptochloa	xx	xxx	x	xxx	xxx
Lindernia	xx	-	xx	-	xx
Oryza	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Panicum	-	x	xx	x	-
Paspalum	xx	xx	x	xx	x
Polygonum	xxx	x	xx	xx	x
Schoenoplectus	xxx	-	xxx	xxx	xxx
Setaria	x	-	xxx	-	x
Typha	xxx	xx	x	xx	xx

Fuente: Kraehmer et al., 2017. x: Importancia menor, xx: importancia intermedia, xxx: mayor importancia. Puede ser variable dentro de cada país.

Especies de *Echinochloa*

El género más frecuente e importante es *Echinochloa*, hualcachos, representado por cuatro especies: *E. crus-galli* (L.) P. Beauv., *E. erecta* (Polacci) Pignatti, *E. phyllopogon* (Stapf) Stapf ex Kossenko, y *E. colona* (L.) Link. En particular, *E. crus-galli* está presente en todos los campos de arroz italiano. Se estima que *E. erecta* se disemina en aproximadamente 60 % de los campos; *E. phyllopogon* ahora se distribuye en aproximadamente 50 % de los campos y su frecuencia ha estado aumentando en los últimos años; *E. colona* es menos frecuente e infesta alrededor del 20 % de los campos. El género completo, y *E. crus-galli* en particular, se caracteriza por una alta variabilidad de morfología, patrón de crecimiento, macollamiento, germinación y sensibilidad a los herbicidas (Vidotto et al., 2007b; 2015). Por lo tanto, la atribución de un determinado individuo a una especie puede ser difícil y los resultados a menudo son inciertos.

Uno de los principales problemas en el manejo los hualcachos es la propagación de poblaciones resistentes a herbicidas. Existen poblaciones *de E. cruz-galli* resistentes a herbicidas inhibidores de la ALS (Panozzo et al., 2013) y otras que muestran una resistencia múltiple a los inhibidores de la ALS y la enzima acetil coenzima A carboxilasa (ACC-asa); en *E. erecta* existen poblaciones resistentes al propanil y al quinclorac.

Especies *Heteranthera*

Estas malezas monocotiledóneas son plantas exóticas que se reportaron por primera vez en Italia en 1962 (Pirola, 1968). Actualmente, las principales especies que se encuentran en los campos de arroz europeos son *H. reniformis* Ruiz & Pav., *H. rotundifolia* (Kunth) Griseb., y *H. limosa* (Sw.) Willd. La primera especie es la más frecuente y, en algunos casos, si no se maneja adecuadamente las infestaciones pueden llegar a ser muy abundantes, lo que proporciona una cobertura del suelo de hasta 100 % en campos completos (Ferrero, 1996).

Especies *Alisma* y *Cyperaceae*

Las principales especies incluidas en este grupo son *Alisma plantago-aquatica* L., *A. lanceolatum* With., *Cyperus difformis* L., *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla y *Schoenoplectus mucronatus* (L.) Palla ex A. Kern.

Las especies de *Alisma* se encuentran con frecuencia en los campos arroceros italianos y están atrayendo la atención, en particular desde que se informaron casos de resistencia a los herbicidas inhibidores de la ALS.

Cyperus difformis es un ciperácea anual que puede germinar más tarde en la temporada (alrededor de mayo) que la mayoría de las otras malezas del arroz. A pesar de su escasa capacidad competitiva, también puede ser un problema debido a la presencia de casos de resistencia a los inhibidores de la ALS.

Bolboschoenus maritimus (syn. *Scirpus maritimus*) es una planta perenne que se propaga principalmente a través de rizomas y tubérculos. *Schoenoplectus mucronatus* es una planta perenne con rizomas cortos que en los campos de arroz se comporta como una especie anual y se reproduce por semillas. En los arrozales europeos es una de las malezas más comunes; sin embargo, no prospera en suelos muy salinos y rara vez crecen en campos con una larga historia de cultivo continuo de arroz (Marnotte et al., 2006). Algunas poblaciones de *S. mucronatus* han desarrollado resistencia a los herbicidas inhibidores de la ALS en Italia.

Arroz rojo

En Italia hay varias poblaciones que pueden diferenciarse sobre una base morfológica. En un estudio realizado en el área principal de cultivo de arroz, se identificaron unas 150 poblaciones

visualmente distinguibles, pero es posible que las variantes morfológicas puedan ser aún más (Fogliatto et al., 2012).

El arroz rojo es un competidor fuerte y su presencia continua en el campo está asegurada por el quiebre de la dormancia de sus semillas (Vidotto y Ferrero, 2009; Andres et al., 2015). Además, parte de las semillas se cosechan junto con el arroz, reducen su calidad, crean la necesidad de realizar un procesamiento adicional y los productores obtienen un precio más bajo por el producto.

Se puede estimar que más del 80 % de los arrozales italianos, están infestados con arroz rojo. A pesar de la gran adopción de variedades tolerantes a IMI, el arroz rojo todavía se considera una de las malezas graves del cultivo. En los últimos años se han encontrado varias poblaciones resistentes al imazamox, lo que se ha relacionado con la introducción de variedades tolerantes a IMI (Scarabel et al., 2012), porque nunca antes se encontró resistencia a la imidazolinona en las poblaciones de arroz rojo italianas (Andres et al., 2013; 2014). Este fenómeno no parece haber empeorado, ya que hasta ahora los agricultores no lo han percibido como una amenaza real.

Las poblaciones de arroz rojo diseminadas en Italia se pueden dividir en grupos en función de las características de la arista. La mayoría tiene arista (56 %), seguido por aquellas sin arista (27 %), con las variantes de aristas pajizas, negras y puntiagudas (17 %, con arista muy corta y oscura).

La ausencia de arista se asocia con algunas otras diferencias morfológicas: las poblaciones con aristas tienen semillas más largas y la emisión de panícula es más temprana, las puntiagudas tienen semillas más livianas y las plantas son más pequeñas, las poblaciones con aristas tienen el menor número de semillas por panícula (Fogliatto et al., 2012). El origen del arroz rojo italiano no está completamente claro, pero parece que existe una relación genética significativa con las variedades antiguas. Usando marcadores microsatélites de la distancia genética entre germoplasmas, se encontró que varias poblaciones de arroz rojo se agrupan con algunas variedades antiguas (Ranghino, Ostiglia, Bertone y Carnaroli) y con una sola variedad moderna (Flipper) (Grimm et al., 2013).

Malezas de siembra en seco

Como en este caso el cultivo de arroz se divide en dos fases, la primera en condiciones secas y la segunda en condiciones inundadas, generalmente se pueden encontrar dos comunidades de malezas diferentes, relacionadas con el ambiente seco o inundado. Las principales malezas en el suelo seco son *Echinochloa* spp., *Panicum dichotomiflorum* Michx., *Bidens* spp., *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop., *Polygonum* spp., *Chenopodium album* L., y *Amaranthus retroflexus* L. Otro grupo de malezas se desarrolla después de la inundación del cultivo que comienza cuando éste está en la etapa de macolla e incluye las mismas especies acuáticas o semiacuáticas mencionadas anteriormente. En estas condiciones culturales se requieren programas específicos de control de malezas para ambos grupos de malezas.

Programas de manejo de malezas

De acuerdo con el sistema de cultivo adoptado (siembra pre-germinada en campos inundados o siembra en seco), las especies de malezas presentes en el campo (y en particular la presencia/ausencia de arroz rojo), y las variedades (convencionales o tolerantes a IMI), se pueden adoptar varios programas de manejo de malezas.

El primer caso corresponde a cuando el arroz se siembra en los campos inundados que es la condición más común. En el caso de que no haya arroz rojo, generalmente se requiere de uno a tres tratamientos con herbicidas. El primero está dirigido principalmente a controlar *Heterantera* y parcialmente *Echinochloa* y se realiza pocos días antes de la siembra, usando oxadiazon.

Luego, en post-emergencia, se realizan uno o dos tratamientos para controlar *Echinochloa*, *Cyperaceae* y *Alismataceae* mediante el uso de inhibidores de la ALS, solos o en mezcla con cyhalofop o propanilo. Si no hay *Heteranthera*, entonces sólo se requieren tratamientos post-emergentes.

El segundo caso corresponde a cuando también hay arroz rojo. Si se usan variedades convencionales (no tolerantes a IMI), el arroz rojo puede controlarse con flufenacet aplicado antes de la siembra del arroz (unos 30 d antes de la siembra), o adoptando la técnica de semillero. En esta condición, el campo se irriga una vez para promover la germinación de las malezas y luego las plántulas se destruyen utilizando glifosato, cicloxidim o propaquizafop (Fogliatto et al., 2013). En la post emergencia del cultivo, un método para limitar la entrada del banco de semillas es usar una barra de cuerda embebida con glifosato que toque sólo las partes apicales de las plantas de arroz rojo, como las plantas de *Echinochloa* que generalmente son más altas que el arroz. Usando un enfoque similar, las barras de cuerda se pueden sustituir por barras de corte (Foto 1).

Foto 1. Barra de corte producida por un fabricante italiano, trabajando en un campo de arroz para eliminar los órganos reproductores de las malezas más altas que el arroz (en particular, el arroz malezas y *Echinochloa* spp.) Desde https://www.meneguzzo.eu/.

En el arroz sembrado en seco, durante la fase inicial del cultivo seco, es importante controlar las malezas típicas de otros cultivos anuales de verano, como *Panicum* o *Echinochloa*. Para este propósito, clomazone, pendimetalina (generalmente en mezcla) con o sin oxadiazon, se aplican en la preemergencia de cultivos. Entonces, puede ser suficiente un tratamiento adicional posterior a la emergencia (principalmente con inhibidores de ALS) realizado inmediatamente antes de comenzar la fase de inundación. A veces se puede requerir un segundo tratamiento posterior a la emergencia.

Con el uso de variedades tolerantes a IMI es posible simplificar el manejo completo de las malezas. En condiciones de siembra seca, se requiere un tratamiento de preemergencia con oxadiazon, clomazone y pendimetalina. Además de este tratamiento, todo el manejo se basa en una doble aplicación de imazamox a 35 g i.a. ha^{-1}. El intervalo entre los tratamientos es de 2 a 3 semanas. El segundo tratamiento está dirigido a controlar las plantas de arroz rojo que podrían haber escapado del primer tratamiento y las que surgieron más tarde.

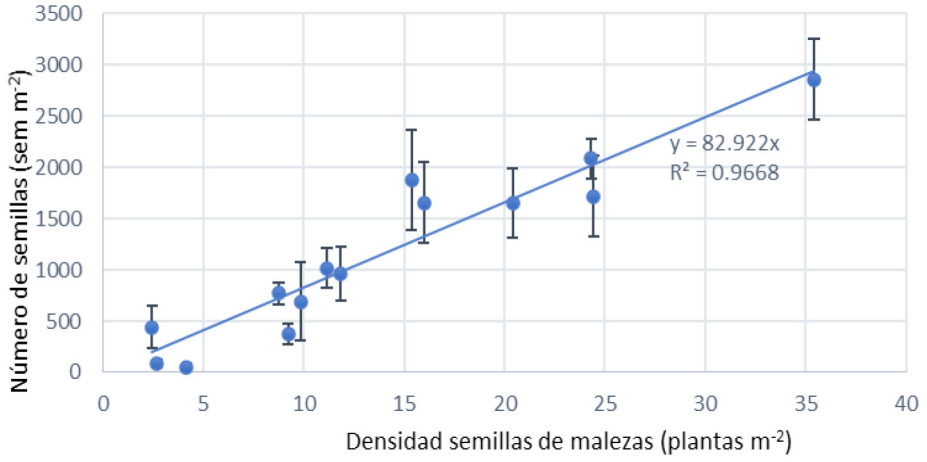
Manejo del banco de semillas de malezas

Aunque todos son conscientes de la importancia del banco de semillas de malezas, su manejo se percibe como una piedra angular en el control de malezas en el arroz, generalmente sólo cuando los programas convencionales de control de malezas son defectuosos, poco efectivos o no pueden aplicarse por alguna razón.

Algunos ejemplos en los que pueden ocurrir una o más de estas condiciones son: manejo de malezas de difícil control (como el arroz rojo), problemas emergentes (como resistencia a herbicidas, reducción en el número de herbicidas disponibles, etc.), manejo de malezas en sistemas específicos de cultivo de arroz, como ejemplo, el arroz orgánico.

Varios estudios han señalado que el control de malezas en general y el manejo del banco de semillas de malezas en particular, necesitan la combinación de varias prácticas, ya que las prácticas de control de malezas individuales tienen un efecto parcial en el banco de semillas (Ferrero et al., 1999; Vidotto et al., 2001).

El problema es que el banco de semillas es difícil de manejar, porque sólo una pequeña proporción de semillas se convierte en plántulas cada año. Por ejemplo, en el arroz rojo sólo alrededor del 5 % de las semillas en la capa de 0 a 20 cm dan origen a plántulas (Vidotto y Ferrero, 2000). Esto puede considerarse un valor pequeño, e incluso puede reducirse mediante el control de las plántulas, pero debe tenerse en cuenta que la lluvia de semillas (´rain seed`) puede ser muy alta y anular parcialmente los efectos del control de malezas. En la misma especie, la lluvia de semillas puede corresponder a más de 80 veces la densidad final de las plantas maduras (Figura 3). En otras palabras, no importa cuán precisa sea la gestión de malezas, pocos escapes pueden ser suficientes para mantener el banco de semillas en niveles altos.



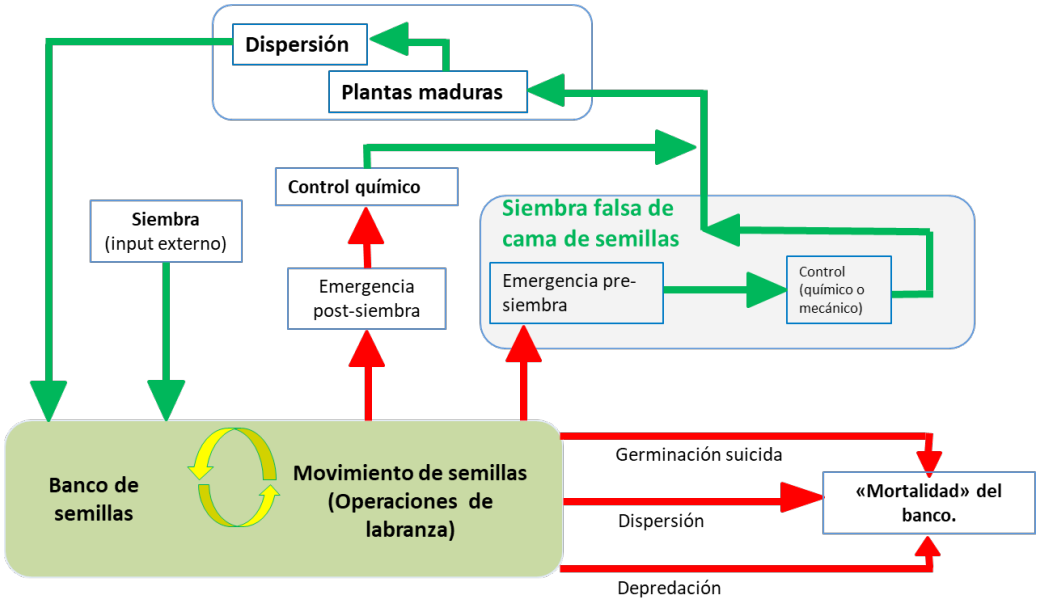
Fuente: Vidotto et al., 2007.

Figura3. Relación entre densidad de plantas maduras de arroz maleza y ´lluvia de semillas`.

Un sistema que puede ser útil para comprender dónde es posible realizar acciones para administrar el banco de semillas, consiste en modelar el ciclo de vida de las malezas en relación con las prácticas agronómicas. El diagrama de flujo de un modelo hipotético para el arroz de malezas se representa en la Figura 4. El modelo está básicamente construido alrededor de la dinámica del banco de semillas de arroz rojo. El banco de semillas se considera un reservorio y su tamaño está regulado por salidas y entradas. Como resultados se consideran la mortalidad de las semillas y las emergencias que ocurren inmediatamente antes de la siembra de arroz o durante el cultivo de arroz. Otros elementos incluidos en el modelo son los efectos de las medidas de control que influyen en el número de plantas sobrevivientes. El modelo calcula la biomasa de arroz rojo por m^2 y las semillas producidas que representan el insumo principal del banco de semillas. Otra entrada

está representada por las semillas de arroz rojo que van con la semilla de arroz. Esto es importante porque la legislación actual de la UE permite hasta 0,03 % de los granos de arroz rojo en semillas comerciales de arroz.

Con este modelo es posible, por ejemplo, estimar el efecto de varias combinaciones de prácticas agronómicas y técnicas de control.



Fuente: Vidotto et al., 2001; Ziska et al., 2015.

Figura 4. Ejemplo del modelo de ciclo de vida del arroz rojo.

Con este modelo es posible simular el efecto de diferentes secuencias de cultivo de variedades tolerantes a IMI y convencionales, ya sea en monocultivo o en un sistema de rotación.

En el caso del monocultivo de arroz, asumiendo que no hay resistencia a IMI que se seleccione ni se transfiera al arroz rojo, y a partir de un banco de semillas inicial de 1.100 semillas m^{-2} (5 cm superiores del suelo), el modelo predice un agotamiento del banco de semillas, tanto cuando las variedades tolerantes a IMI se cultiven cada 2 años o si se cultivan durante 2 años consecutivos, alternadas con 1 año de variedades convencionales. Con el cultivo de sólo variedades convencionales, si el arroz rojo no se controla, el banco de semillas permanece bastante alto y estable. En los escenarios que incluyen rotación con Clearfield, el agotamiento del banco de semillas se produce siempre más rápido que en los casos anteriores. Los mejores resultados se predijeron en particular para las rotaciones que comienzan con un cultivo diferente del arroz (Figura 5).

Esto es sólo una simulación, no un estudio real, pero está en consonancia con lo que sabemos sobre la efectividad de la rotación de cultivos en el manejo de malezas, en particular en el arroz, donde la interrupción de las condiciones de inundación puede contribuir a reducir la presión para la selección de una flora de malezas altamente especializada.

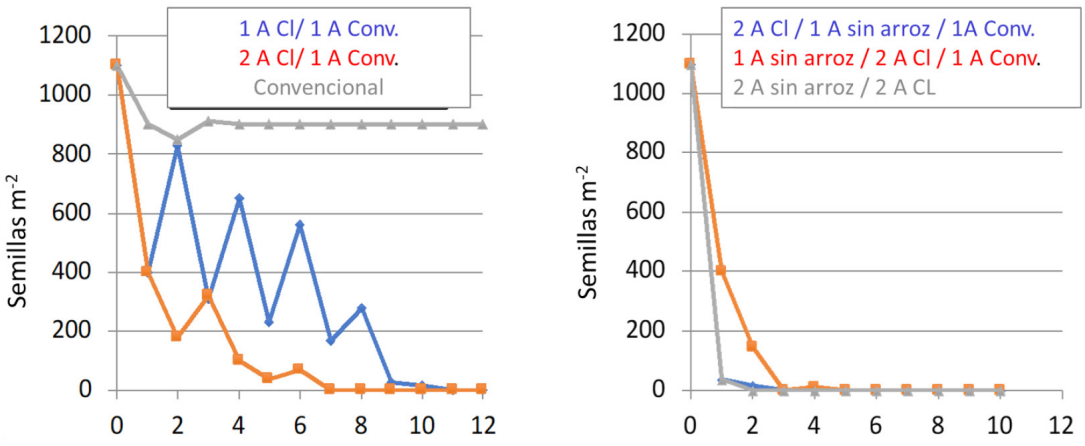


Figura 5. Ejemplos de simulaciones de la dinámica de bancos de semillas de arroz rojo, calculados utilizando el modelo representado en la Figura 4 en monocultivo de arroz y en un sistema de cultivo rotativo. Banco de semillas inicial: 1.100 semillas m^{-2} en los 5 cm superiores del suelo. CL: Arroz Clearfield (variedad tolerante a imidazolinonas [IMI]); Conv.: variedad de arroz convencional (no tolerante a IMI). Las simulaciones suponen que no hay resistencia a IMI que se seleccione ni se transfiera a arroz rojo.

Inundación invernal

En Europa, y particularmente en Italia, la labranza del suelo se realiza principalmente en otoño, cuando el contenido de humedad del suelo suele ser más adecuado. A pesar de que esta labranza mejora la degradación de los residuos del cultivo y la estructura del suelo, la labranza realizada inmediatamente después de la cosecha del cultivo, tiene como consecuencia la incorporación de semillas de malezas en el suelo, incluidas las semillas de arroz rojo a profundidades variables, de modo que baja la liberación de la dormancia y prolonga su longevidad (Delouche et al., 2007).

Las inundaciones de invierno se pueden utilizar para mejorar la descomposición de los residuos y se adoptan en algunas áreas como una práctica alternativa a la quema de la paja de arroz y labranza de otoño (van Groenigen et al., 2003). Esto puede actuar como un semillero para promover la germinación de las semillas de malezas, incluido el arroz rojo.

Las inundaciones de invierno comienzan inmediatamente después de la cosecha de arroz, sin la labranza de otoño, y terminan antes de que ocurra la labranza del semillero en la primavera. En un estudio de 3 años realizado en Italia, se observó que las inundaciones de invierno causaron casi un 100 % de agotamiento del banco de semillas superficial de malezas (la lluvia de semillas se produjo en el verano anterior). Las razones de por qué sucedió esto no estaban claras, pero se puede suponer que las inundaciones invernales aumentaron la depredación, aceleraron los procesos de descomposición y favorecieron la germinación suicida de algunas especies y del arroz rojo en particular (Fogliatto et al., 2010).

La mayoría de las poblaciones de arroz convencional italiano tienen semillas latentes y no pueden germinar en otoño, inmediatamente después de que son producidas por la planta madre. Sin embargo, si las semillas se mantienen en condiciones de inundación, la latencia se libera rápidamente, especialmente en poblaciones sin aristas. Después de 15 d de inundación, 50 % de las semillas puede germinar y originar las plántulas que serán eliminadas por las bajas temperaturas en invierno (Fogliatto et al., 2011).

Casos especiales en sistemas europeos de cultivo de arroz: arroz orgánico

Hoy en día, en Italia el arroz se cultiva orgánicamente en aproximadamente 5 % de toda el área y con un interés creciente entre los agricultores, porque el precio del arroz orgánico es 2 a 3 veces el precio del arroz convencional.

El principal problema en el cultivo de arroz orgánico es el manejo de malezas, por lo que en los últimos años se han iniciado muchas actividades de investigación para encontrar soluciones alternativas.

Un posible sistema para favorecer el manejo no químico de las malezas es el trasplante mecánico que ya se utiliza en gran medida en otras partes del mundo. El trasplante permite una siembra tardía, que a su vez permite que crezca un cultivo de cobertura antes del trasplante, o realizar una o dos siembras falsas antes del trasplante.

Como las plantas trasplantadas se disponen en hileras separadas a 30 cm, es posible ejecutar un control mecánico de malezas entre ellas (Foto 2). Éste sigue siendo un aspecto crítico, así como todo el proceso de suministro de la planta que necesita que todos los actores involucrados (vivero, trasplantadora, agricultor) estén sincronizados.

Los primeros resultados son alentadores. Teniendo en cuenta que el rendimiento promedio de arroz en la producción orgánica se estima en alrededor de un tercio a la mitad del rendimiento obtenido en una producción convencional, el trasplante puede permitir obtener rendimientos más altos si todas las prácticas de cultivo, en especial el control mecánico de malezas, se realizan a tiempo y de buena forma. La técnica parece ser más adecuada para ciertos grupos de variedades, y en particular para el arroz híbrido (Vidotto et al., 2018). Estas variedades requieren una densidad de siembra muy baja que a veces es difícil de obtener con la sembradora tradicional que utiliza esparcidores de fertilizantes. El trasplante permite espaciar las plantas de manera uniforme en el campo y les permite producir abundantes macollas.

Foto 2. Trasplante mecánico de arroz orgánico en el noroeste de Italia (izquierda) y control mecánico de malezas entre hileras (derecha).

Otra técnica que varios agricultores están probando es el acolchado de plástico con películas biodegradables (Foto 3). Es una forma de siembra directa en seco y, por lo tanto, no se requiere un vivero. En la actualidad, las películas adaptadas son derivadas de almidones, celulosa, aceites vegetales y sus combinaciones (Mater-Bi de Novamont) o de una base fósil (Ecoflex y Ecovio de BASF).

Sin embargo, un aspecto crítico que aún debe resolverse es el control de malezas entre las tiras de película, lo que se puede hacer mecánicamente o con compuestos autorizados en la agricultura

orgánica. Una ventaja de la técnica es la reducción de los requisitos de riego, especialmente si se integra el riego por goteo, superficial o subsuperficial (Ferrero et al., 2018).

Foto 3. Acolchado plástico con películas biodegradables. En este campo, el riego se realiza mediante riego por goteo subsuperficial.

Un tercer enfoque que se está usando en Italia, es el acolchado verde. En este caso, un cultivo de cobertura se siembra en otoño, por ejemplo, centeno, triticale o mezclas. El cultivo de cobertura crece en otoño y en primavera. Alrededor de mediados de mayo, el arroz se distribuye directamente sobre el cultivo de cobertura, inmediatamente después de que finaliza la cobertura con un rolo faca, o un rodillo triturador de rastrojos. Concluida la labor mecánica, el campo se inunda y el cultivo de cobertura comienza a podrirse y el crecimiento de las malezas se inhibe, tanto por la acción física, como por la química.

Foto 4. Campo de arroz en el que se cultiva, desde el otoño hasta la primavera, una mezcla de ballica italiana (*Lolium multiflorum* Lam.) y arveja (*Vicia villosa* Roth), y luego se termina con un picador inmediatamente después de la siembra de arroz. Foto de fines de mayo, después de un drenaje para promover el enraizamiento del arroz.

La eficacia de esta técnica es variable y sólo puede tener éxito si el cultivo de cobertura está bien establecido y produce una biomasa adecuada. Algunas especies, como la arveja, se pueden congelar en parte debido a las bajas temperaturas durante el invierno, lo que proporciona una cobertura insuficiente del suelo en primavera y una baja cantidad de biomasa. El crecimiento de las plántulas de arroz puede verse afectado por la biomasa en putrefacción. Para evitar esto, los agricultores suelen secar los campos durante unos días para promover el enraizamiento (Foto 4).

Referencias

Andres, A., Fogliatto, S., Ferrero, A., et al. 2014. Susceptibility to imazamox in Italian weedy rice populations and Clearfield® rice varieties. Weed Res. 54:492-500.

Andres, A., Fogliatto, S., Ferrero, A., et al. 2015. Growth variability of Italian weedy rice populations grown with or without cultivated rice. Crop Sci. 55:394-402.

Andres, A., Vidotto, F., Fogliatto, S., et al. 2013. Assessment of weedy rice sensitivity to imazamox with a fast dose-response bioassay. p. 243-243. In 16th EWRS Symposium, Samsun, Turkey. European Weed Research Society (EWRS), Doorwerth, The Netherlands

Biroli, G. 1807. Del riso: trattato economico-rustico. Tipografia Giovanni Silvestri, Milan, Italia.

Delouche, J.C., Burgos, N.R., Gealy, D.R., et al. 2007. Weedy rices: Origin, biology, ecology and control. FAO, Rome, Italy.

ENR. 2015a. Superfici investite a riso 2015. Ente Nazionale Risi (ENR), Milano, Italia.

ENR. 2015b. XLVIII Relazione Annuale Anno 2015. Ente Nazionale Risi (ENR), Milano, Italia.

ENR. 2016. Superfici investite a riso 2016. Ente Nazionale Risi (ENR), Milano, Italia.

ENR. 2017. Superfici investite a riso 2017. Ente Nazionale Risi (ENR), Milano, Italia.

FAO. 2018. FAOSTAT-Data-Crops. FAO, Rome, Italy. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC.

Ferrero, A. 1996. Prediction of *Heteranthera reniformis* competition with flooded rice using day-degrees. Weed Res. 36:197-201.

Ferrero, A. 2007. Rice scenario in the European Union. Cahiers Agric. 16:272-274.

Ferrero, A., Milan, M., Fogliatto, S., et al. 2018. Subirrigazione e pacciamatura: possibili applicazioni su riso. Informatore Agrario 74:46-9.

Ferrero, A., Tabacchi, M., Vidotto, F. 2002. Italian rice field weeds and their control. p. 535-544. In Proceedings 2nd Temperate Rice Conference. International Rice Research Institute (IRRI), Sacramento, California, USA.

Ferrero, A., Vidotto, F. 2007. Weeds and weed management in Italian rice fields. p. 55-72. In Ferrero, A., Vidotto, F. (eds.) Agro-economical traits of rice cultivation in Europe and India. Edizioni Mercurio, Vercelli, Italy.

Ferrero, A., Vidotto, F. 2010. History of rice in Europe. p. 341-372. In Sharma, S.D. (ed.) Rice - Origin, antiquity and history. Science Publishers-CRC Press, Enfield, New Hampshire, USA.

Ferrero, A., Vidotto, F., Balsari, P., et al. 1999. Mechanical and chemical control of red rice (*Oryza sativa* L. var. *sylvatica*) in rice (*Oryza sativa* L.) pre-planting. Crop Prot. 18:245-251.

Fogliatto, S., Vidotto, F., Andres, A., et al. 2013. Glyphosate sensitivity in Italian weedy rice. p. 242. In 16th EWRS Symposium, Samsun, Turkey. European Weed Research Society (EWRS), Doorwerth, The Netherlands.

Fogliatto, S., Vidotto, F., Ferrero, A. 2010. Effects of winter flooding on weedy rice (*Oryza sativa* L.) Crop Prot. 29:1232-1240.

Fogliatto, S., Vidotto, F., Ferrero, A. 2011. Germination of weedy rice (*Oryza sativa*) in response to field conditions during winter. Weed Technol. 25:252-261.

Fogliatto, S., Vidotto, F., Ferrero, A. 2012. Morphological characterization of Italian weedy rice (*Oryza sativa*) populations. Weed Res. 52:60-69.

Garrity, D.P., Oldeman, L.R., Morris, R.A., et al. 1986. Rainfed lowland rice ecosystems: characterization and distribution. p. 3-23. In Progress in rainfed lowland rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Grimm, A., Fogliatto, S., Nick, P., et al. 2013. Microsatellite markers reveal multiple origins for Italian weedy rice. Ecol. Evol. 3:4786-4798.

ISTAT. 2018. Numero di aziende e superficie agricola. Istituto nazionale di statistica (ISTAT), Roma, Italia.

Jacometti, G. 1912. Le erbe che infestano le risaie italiane. p. 57-93. Vol. 4. In Atti del Congresso Risicolo Internazionale, Vercelli, Italia.

Kraehmer, H., Jabran, K., Mennan, H., et al. 2016. Global distribution of rice weeds – A review. Crop Prot. 80:73-86.

Kraehmer, H., Thomas, C., Vidotto, F. 2017. Rice production in Europe. p. 93-116. In Chauhan, B.S., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice production worldwide. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.

Marnotte, P., Carrara, A., Dominati, E., et al. 2006. Plantes des rizières de Camargue. Éditions Quae Gie, Versailles, France.

Panozzo, S., Scarabel, L., Tranel, P.J., et al. 2013. Target-site resistance to ALS inhibitors in the polyploid species *Echinochloa crus-galli*. Pestic. Biochem. Phys. 105:93-101.

Pirola, A. 1968. *Heteranthera reniformis* Ruitz Pavon (Pontederiaceae) avventizia delle rizaie pavesi. Il Riso: 4:18-21.

Scarabel, L., Cenghialta, C., Manuello, D., et al. 2012. Monitoring and management of Imidazolinone-resistant red rice (*Oryza sativa* L., var. *sylvatica*) in Clearfield® Italian paddy rice. Agronomy 2:371-383.

van Groenigen, J.W., Burns, E.G., Eadie, J.M., et al. 2003. Effects of foraging waterfowl in winter flooded rice fields on weed stress and residue decomposition. Agric. Ecosyst. Environ. 95:289-296.

Vidotto, F., Ferrero, A. 2000. Germination behaviour of red rice (*Oryza sativa* L.) seeds in field and laboratory conditions. Agronomie 20:375-382.

Vidotto, F., Ferrero, A. 2009. Interactions between weedy rice and cultivated rice in Italy. Ital. J. Agron. 4:127-136.

Vidotto, F., Ferrero, A. 2013. Weed management in Italian rice fields. p. 139-144. In XIV Congreso de la Sociedad Española de Malherbología. Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain.

Vidotto, F., Ferrero, A., Ducco, G. 2001. A mathematical model to predict the population dynamics of *Oryza sativa* var. *sylvatica*. Weed Res. 41:407-420.

Vidotto, F., Fogliatto, S., Dalla Valle, N., et al. 2015. Efficacy of rice herbicides on *Echinochloa* spp. as affected by repeated use. In 17th European Weed Research Society Symposium (EWRS) 2015. Association Française de Protection des Plantes, Montpellier, France.

Vidotto, F., Fogliatto, S., Zafferoni, M., et al. 2018. Il trapianto meccanico, opportunità per il riso bio. Informatore Agrario 74:50-52.

Vidotto, F., Tesio, F., Patracchini, C., et al. 2007a. Effects on weedy rice seeds of rice field overwinter flooding. p. 134-135. In Proceedings of the Fourth Temperate Rice Conference. S.I.R.F.I., Novara, Italy.

Vidotto, F., Tesio, F., Tabacchi, M., et al. 2007b. Herbicide sensitivity of Echinochloa accessions in Italian rice fields. Crop Prot. 26:285-293.

Ziska, L.H., Gealy, D.R., Burgos, N., et al. 2015. Weedy (red) rice: An emerging constraint to global rice production. Adv. Agron. 129:181-228.

Capítulo 20. Malezas del cultivo de arroz en Chile

Alicia Marticorena G., Víctor Finot S

Las especies vegetales introducidas en Chile, han ido llegando paulatinamente desde otras áreas del mundo, desde los tiempos de la colonia, mediante las actividades directas o indirectas del hombre. Estas especies, están actualmente presentes en casi todos nuestros ecosistemas, siendo particularmente abundantes en la zona central del país (Ramírez, 1980; Matthei et al., 1995; Fuentes et al., 2014).

Dentro de estas especies están las consideradas malezas que corresponden a aquellas especies que representan un problema para los cultivos (Fuentes et al., 2014), aunque algunas pueden ser especies nativas también. En general, el término maleza se aplica a aquellas especies que crecen en lugares destinados a otras plantas y que interfieren en las labores agrícolas produciendo pérdidas económicas que pueden llegar a ser muy importantes (Ramírez et al., 1991, Matthei et al., 1995). Sin duda, se trata de plantas adaptadas para prosperar en ambientes antrópicos y, desde este punto de vista, se clasifican en malezas agrícolas o agrestales (que afectan a los cultivos agrícolas y forestales) y malezas ruderales (que crecen asociadas al hombre en ambientes no cultivados, como ciudades, caminos, sitios eriazos, etc.). La mayor diversidad de especies de malezas se encuentra en la zona central del país, que corresponde a la zona más intervenida por el hombre, con mayor concentración de habitantes, ciudades, cultivos, plantaciones forestales, ganadería e industrias (Finot et al., 2000).

La mayor parte de las malezas que crecen en Chile tiene su origen biogeográfico en Eurasia (cerca del 60 %), mientras las especies de origen americano, incluyendo las nativas, alcanzan a poco más del 30 %). Un número relativamente más bajo procede de África (0,4 %) y Oceanía (0,4 %). Unas cuantas especies se consideran cosmopolitas (cerca del 3 %) (Matthei et al., 1995).

El control adecuado de las malezas es una de las labores agronómicas más importantes a realizar en el cultivo del arroz. Las principales razones son: 1) disminución de efectos negativos en el rendimiento en grano del cultivo, debido a la competencia entre el cultivo y las malezas por la radiación solar, nutrientes y agua (Dass et al., 2017); 2) disminución de la contaminación y costos de producción, al realizar un control preciso de las malezas, evitando incrementar el número de aplicaciones y concentración de herbicidas (Cerejeira et al., 2003; Pedreros y Kramm, 2007); 3) incremento del valor del producto, al reducir la presencia de semilla maleza posterior a la cosecha.

La presencia de malezas es un problema permanente e importante en el cultivo de arroz en Chile y en el mundo. Durante los primeros años, cuando el cultivo fue introducido en nuestro país, las malezas no representaron un gran problema en el desarrollo de este cultivo. Las principales causas de esta situación inusual fueron la utilización de suelos sin uso agrícola anterior para este cultivo y un manejo agronómico que incluía la mantención de una lámina de agua de 5 a 20 cm, lo que impedía el desarrollo de malezas no adaptadas a esas condiciones. Además, la ausencia del uso de fertilizantes en los inicios de este cultivo en Chile, evitó una mayor competencia en el sistema cultivo-maleza. Sin embargo, la situación cambió rápidamente, ya que se comenzaron a observar malezas adaptadas a vivir en condiciones acuáticas, las que, en ausencia de adecuados métodos de control, se fueron estableciendo como parte del sistema de cultivo. Unido a esta situación, comenzaron a introducirse malezas que estaban ausentes en el país, como el arroz rojo, posiblemente con la introducción de semillas, actividad muy común desde 1920 hasta 1950. Desde entonces, las malezas han constituido uno de los principales problemas agronómicos que enfrenta el cultivo del arroz, tanto en el sistema de siembra inundado como en la siembra directa. Por esta razón, la identificación clara y precisa de las malezas en el cultivo del arroz, nos permitirá conocer de mejor manera su comportamiento ecofisiológico, lo que incrementará la eficiencia en su control, mejorando la sustentabilidad del cultivo (Pedreros y Kramm, 2007).

La botánica sistemática ha resurgido fuertemente en los últimos veinte años, gracias al advenimiento de las técnicas moleculares que han permitido replantear las relaciones filogenéticas entre las plantas. Esto ha llevado a que los especialistas se hayan visto en la necesidad de proponer cambios en los nombres de muchas especies, lo que produce mucha confusión en los no especialistas. Por ello, es necesario entregar estudios florísticos y catálogos actualizados de las especies, particularmente de aquellas tan asociadas al trabajo humano como son las malezas.

Existen varios trabajos en el país que informan la presencia de las principales malezas en el cultivo del arroz en el país. Sims y Alvarado (1972), señalan la presencia de 13 malezas en el arroz, pertenecientes a las familias Poaceae (5), Cyperaceae (4), Alismataceae (2) y Typhaceae (2). Una prospección de las principales malezas asociadas al cultivo en la zona productora de arroz detectó 25 especies de malezas, de las cuales 19 pertenecían a la clase Monocotiledoneae, y seis a la clase Dicotiledoneae. En la clase Monocotiledoneae se encontraron malezas pertenecientes a las familias Alismataceae (2), Cyperaceae (8), Poaceae (4), Juncaceae (4). En la clase Dicotiledoneae se detectaron malezas pertenecientes a las familias Asteraceae (1), Lythraceae (2), Onagraceae (1) y Polygonaceae (2). Del total de malezas encontradas en el cultivo, se detectaron nueve malezas no descritas en el cultivo (Ormeño, 1983). Posteriormente, en una descripción de la flora de malezas presentes en los arrozales de la zona central del país, entre la comuna de Pelarco (provincia de Talca, Región del Maule) por el norte, hasta la comuna de Parral (provincia de Linares, Región del Maule) por el sur, se detectaron 119 especies de malezas, pertenecientes a 29 familias y 80 géneros. Del total de las especies encontradas, un 93 % eran introducidas y sólo un 6,7 % correspondían a flora nativa (San Martín y Ramírez, 1983). Las malezas introducidas provenían principalmente de Europa (49,6 %), Sudamérica (22,7 %) y de otros países (10 %). Las malezas encontradas en los arrozales se dividieron en tres tipos: aquellas que correspondían a plantas típicamente terrestres, que habitaban en pretiles y bordes de canales y que pueden soportar un anegamiento temporal; las malezas típicas de pantano que viven en lugares anegados, pero que parte de sus órganos fotosintéticos se desarrollan fuera del agua; y las plantas que son acuáticas y que viven en lugares inundados, ya sea sumergidas o con órganos que flotan en la superficie del agua.

La mayor concentración de especies de malezas estuvo en los pretiles (55,4 %), seguido de los cuadros del cultivo (34,5 %), canales (4,2 %) y desagües (5,9 %). En los cuadros del cultivo se detectaron 13 familias con 41 especies de malezas. La distribución de las especies por familia fue la siguiente: Characeae (1), Azollaceae (1), Apiaceae (2), Onagraceae (2), Typhaceae (2), Cyperaceae (11), Poaceae (9), Polygonaceae (3), Asteraceae (4), Lythraceae (2), Lamiaceae (1), Scrophulariaceae (1) y Alismataceae (2) (San Martín y Ramírez, 1983). En el año 1995, se describieron 15 especies de malezas como las más importantes desde el punto de vista económico en el cultivo del arroz, pertenecientes a las familias Alismataceae (2), Cyperaceae (7), Poaceae (2), Typhaceae (1), Potamogetonaceae (1), Lythraceae (1) y Onagraceae (1) (Alvarado y Hernaíz, 1995). En el año 2007, nuevamente 16 malezas y dos algas se identificaron como las más importantes asociadas al cultivo del arroz. Estas malezas pertenecían a las familias Poaceae (6), Alismataceae (4), Cyperaceae (5), Onagraceae (1) y dos algas (*Chara baruni*; y *Nitella acuminata* (Pedreros y Kramm, 2007). En el año 2018, se describieron 13 malezas como las más importantes en el cultivo del arroz inundado y seis malezas que se presentaban en forma más frecuente en la siembra directa. Las malezas frecuentes en la siembra de arroz inundado pertenecían a las familias Poaceae (6), Cyperaceae (3), Alismataceae (3) y Onagraceae (1). En cambio, en la siembra directa del arroz se identificaron las malezas pertenecientes a las familias Poaceae (4), Polygonaceae (1) y Lythraceae (1) (Henríquez et al., 2018).

Un estudio comparativo de la presencia de malezas entre el sistema inundado y el de siembra directa mostró que, en la siembra de arroz inundado se encontraron 15 especies de malezas y 22 en siembra directa, de las cuales 11 son comunes a ambos tipos de siembra. La similitud florística fue de 42 % entre ambos sistemas de siembra. Las familias más representadas fueron Cyperaceae

y Poaceae dentro de la Clase Monocotiledoneae; y Asteraceae y Polygonaceae, dentro de la Clase Dicotiledoneae, detectándose nueve especies nuevas para los arrozales, de las cuales la especie *Bacopa rotundifolia*, Plantaginaceae, constituye un nuevo registro para la flora chilena. Las especies introducidas predominaron sobre las nativas, siendo las europeas un 53 %. La forma de vida predominante fue la terófita con un 50 %. Por otro lado, las plantas acuáticas emergentes representaron un 50 %, las sumergidas un 11 % y las de hojas flotantes un 8 %. En la siembra directa de arroz se encontró un 31 % de plantas terrífitas (Vallejos, 2018).

Se hace necesario mencionar la falta de conocimiento respecto de la fenología de las malezas presentes en el cultivo de arroz, en especial de las más agresivas y de las que tienen mucha similitud morfológica con el arroz, para poder erradicarlas o manejarlas en las primeras etapas de desarrollo, evitando que la competencia afecte el cultivo.

Descripción de las principales malezas presentes en el cultivo del arroz

Identificación de plantas

La primera información disponible para iniciar el proceso de identificación de una planta es el nombre científico. Es el nombre que permite la identificación, clasificación botánica, descripción morfológica e identificación, ya que el nombre común puede cambiar en las diferentes localidades, países y regiones geográficas. El nombre científico es estable, a diferencia del nombre común que puede ser variable.

Ejemplo:

Nombre científico: *Eryngium rostratum* Cav. Nombre común: caucha, cadilla.

El nombre científico de una planta comprende dos palabras. La primera indica el género a que pertenece la planta, en el ejemplo *Eryngium*, y la segunda señala la especie (epíteto específico), en este caso *rostratum***.** Este nombre científico va acompañado de la abreviación del nombre del autor, Cav. (Cavanilles) que describió a la planta y a continuación se menciona, el (los) nombre(s) común (es) si lo(s) tuviese.

Clave de identificación

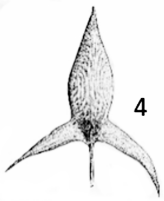
Para ayudar al reconocimiento de las especies presentes en los cultivos de arroz, se confeccionó una clave dicotómica que corresponde a un texto ordenado por frases de a pares que describen características opuestas y contrastantes, y que son observadas en la planta que se desea determinar o reconocer. El uso de esta clave comienza por las dos primeras sentencias 1 y 1′, para indicar si la planta es acuática 1 o terrestre 1´, y se elige una de ellas la que nos llevará al siguiente paso designado por un número de otro par de sentencias que volveremos a leer y elegir una de ellas. De este modo se continuará hasta finalizar en un nombre. Para facilitar su uso, se han incluido ilustraciones de algunos caracteres señalados en la clave.

1. Plantas acuáticas, flotantes o arraigadas 2	
1'. Plantas terrestres, a lo más de lugares húmedos.....14	
2(1). Plantas acuáticas, flotantes.....3	
2'. Plantas acuáticas arraigadas al sustrato, hojas desde lineares a ovadas, de color verde 4	
3(2). Plantas muy pequeñas, hojas muy juntas y comprimidas, de color violáceo oscuro... .....*Azolla filiculoides*	1
3'. Plantas con hojas de alrededor de 2 cm de largo, dobladas a lo largo del nervio medio, de color verde claro.....*Salvinia auriculata*	
4(2'). Hojas sumergidas en el agua, sólo las flores emergen en la superficie.....5	
4'. Hojas y flores emergentes en la superficie del agua.....7	
5(4). Plantas con hojas lineares a angostamente elípticas, dispuestas de 2-3 en verticilos..... *Elodea potamogeton*	2
5'. Plantas con hojas filiformes, gráciles.....6	
6(5'). Flores hermafroditas, dispuestas en espigas..... *Potamogeton pusillus*	3
6'. Flores en racimos axilares, formadas por una flor femenina y otra masculina..... .....*Zannichellia palustris*	
7(4'). Lámina de forma sagitada, como flecha..... *Sagittaria montevidensis* ssp. *chilensis*	4
7'. Lámina redonda a reniforme, oblonga, obovado-lanceolada a linear-lanceolada.....8	
8(7'). Hojas con lámina redonda a reniforme, tallos con estolones..... .....*Hydrocotyle ranunculoides*	5
8'. Hojas con lámina oblonga, obovado-lanceolada a linear-lanceolada, tallos sin estolones. 9	
9(8'). Lámina obovado-lanceolada, flores solitarias amarillas, en la axila de las hojas..... .....*Ludwigia peploides* ssp. *montevidensis*	6
9'. Lámina lanceolada o linear. Flores en inflorescencias racemosas o en espigas.....10	
10(9'). Hojas largamente pecioladas, lámina de 5-20 cm de largo. Flores de color blanco o rosado.....11	
10'. Hojas sin pecíolo, lámina mayor de 20 cm de largo. Flores pequeñas, grises a castañas, poco vistosas 12	
11(10). Lámina oblonga, base cordada a redondeada..... *Alisma plantago-aquatica*	7
11'. Lámina linear-oblonga, atenuada en la base..... *Alisma lanceolatum*	
12(10'). Hojas lanceoladas, de 20-40 cm de largo. Flores dispuestas en panojas laxas, de color grisáceo .....*Phragmites australis*	

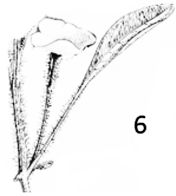
1

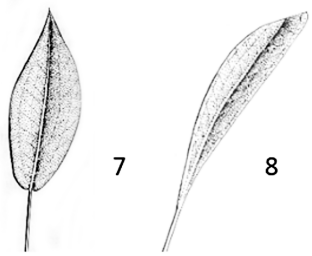
2

3

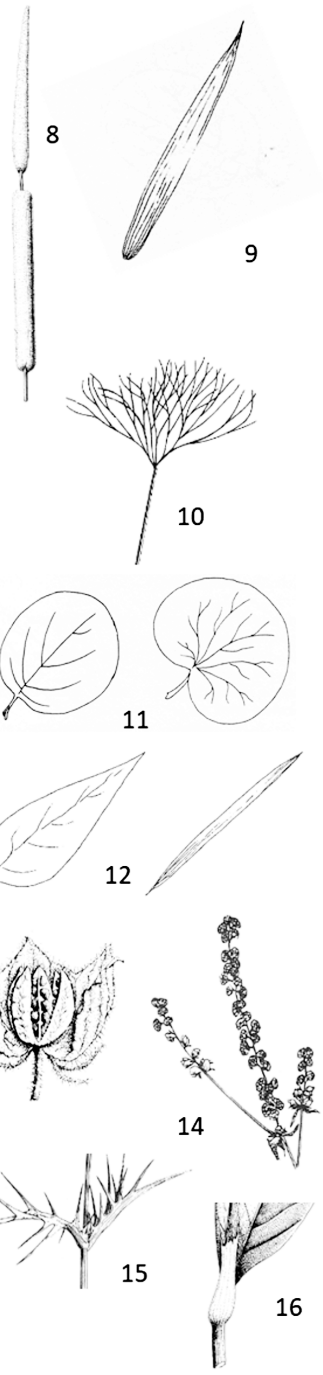

4

5

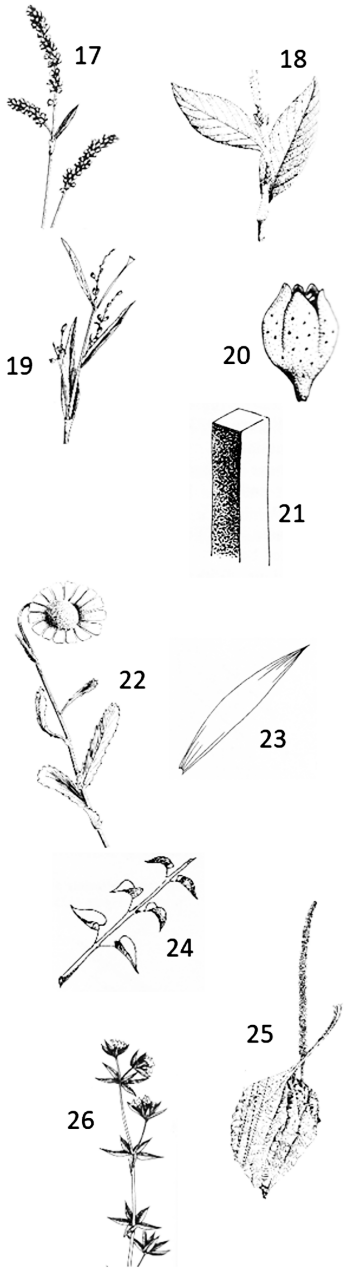

6


7 8

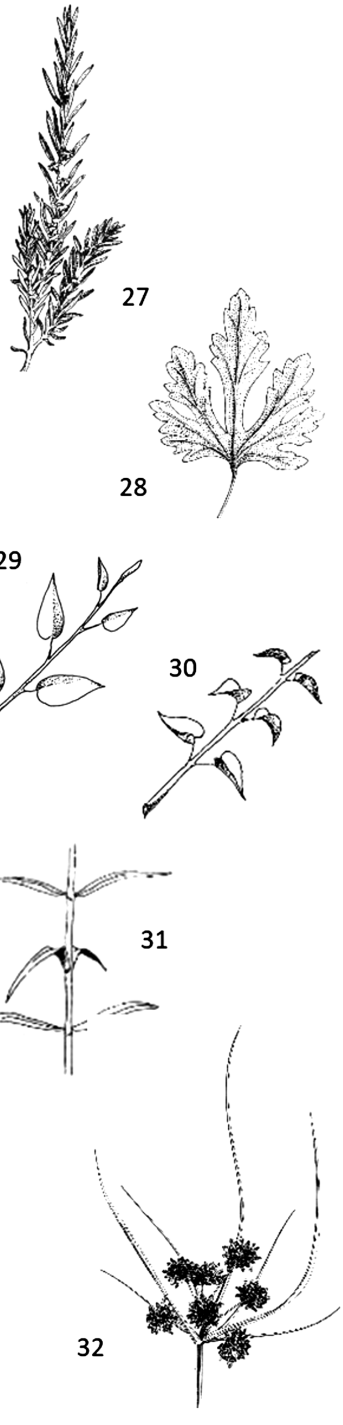
12’. Hojas lineares, de 30-120 cm de largo. Flores dispuestas en espigas cilíndricas, compactas de color castaño.....13	
13(12’). Hojas de 0,3 a 0,7 cm de ancho. Raquis secundarios de base algo escalariforme pero subcilíndricos en la mitad superior.....*Typha angustifolia*	8
13’. Hojas de 0,5 a 1,6 cm de ancho. Raquis secundarios subpiramidales, escalariformes, a veces truncados.....*Typha domingensis*	8
14(1’). Contorno de la lámina linear, lanceolado, ovado a redondeado, con venación reticulada.....15	
14’. Contorno de la lámina linear o linear-lanceolado, con venación paralela.....45	9
15(14). Lámina de la hoja subdividida, partida o lobulada, con segmentos de forma variada.....16	
15’. Lámina de la hoja entera, con el margen liso, dentado o aserrado.....22	
16(15). Hojas con 3-4 divisiones, cada una dividida en varios segmentos lineares muy finos.....*Cyclospermum leptophyllum*	10
16’. Hojas partidas, con segmentos de otra forma.....17	
17(16’). Hoja compuesta, con 2 folíolos basales y 3 apicales, lanceolados a lineares, margen entero.....*Lotus tenuis*	
17’. Hoja dividida con los segmentos con el margen dentado o lobulado.....18	
18(17’). Lámina de ámbito redondeado o reniforme.....19	11
18’. Lámina de ámbito linear, ovado a lanceolados.....20	12
19(18). Flores de a dos en los tallos, de color morado a rosado.....*Geranium molle*	
19’. Flores agrupadas de manera laxa, de color amarillo.....*Ranunculus apiifolius*	
20(18’). Flores solitarias, fruto una cápsula cubierta por el cáliz concrescente..... .....*Hibiscus trionum*	13
20’. Flores dispuestas en capítulos, frutos aquenios.....21	
21(20’). Capítulos numerosos, pequeños, de hasta 3 mm de diámetro, dispuestos en racimos terminales.....*Ambrosia artemisiifolia*	14
21’. Capítulos pocos, de hasta 2,5 cm de diámetro.....*Sonchus oleraceus*	
22(15’). Hojas con el margen espinoso, agudo, punzante..... *Eryngium rostratum*	15
22’. Hojas con el margen no espinoso, de otra forma.....23	
23(22’). Hojas con la base del pecíolo con una vaina membranosa (ócrea) que lo rodea 24	16



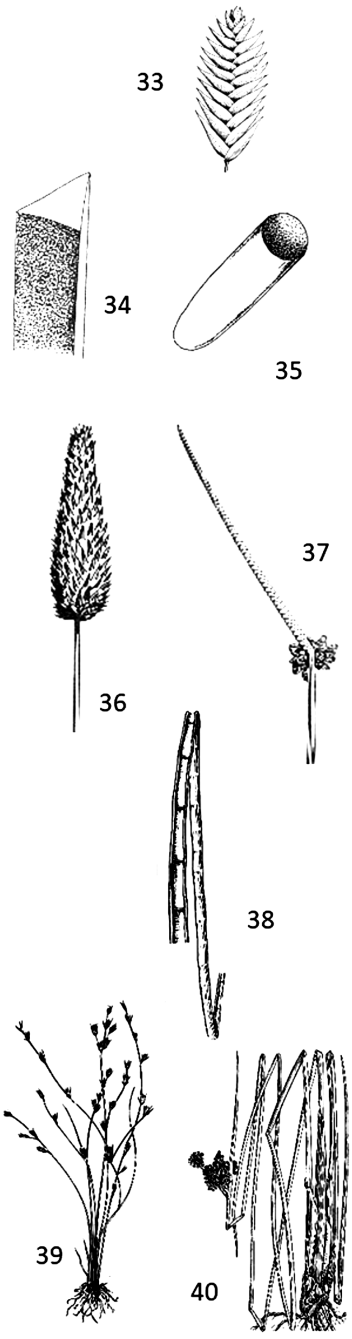
23'. Hojas sin vaina membranosa.....28	
24(23). Flores en racimos espiciforme densos, erguidos. Ócrea que acompaña a las flores acuminada... .....*Polygonum lapathifolium*	17
24'. Flores en racimos espiciforme laxos, a veces nutantes. Ócreas no acuminadas.....25	
25(24'). Ócrea cubre la mitad o más de la mitad de los entrenudos .....*Polygonum acuminatum*	18
25'. Ócrea cubren solo una pequeña parte del entrenudo.....26	
26(25'). Flores en racimos cortos y densos..... *Polygonum persicaria*	
26'. Flores en racimos delgados, laxos.....27	19
27(26'). Hierba anual. Perigonio con glándulas café.....*Polygonum hydropiper*	20
27'. Hierba perenne. Perigonio sin glándulas café.....*Polygonum hydropiperoides*	
28(23'). Tallos cuadrangulares..... *Verbena bonariensis*	21
28'. Tallos de otro tipo..... 29	
29(28'). Flores dispuestas en capítulos..... 30	
29'. Flores solitarias o dispuestas de otra forma.....32	
30(29). Capítulos solitarios al final de los tallos.....31	
30'. Capítulos numerosos dispuestos en tallos ramificados o no.....34	
31(30). Capítulo de 2 cm de diámetro, hojas obovado-espatuladas, ápice obtuso..... .....*Coleostephus myconis*	22
31'. Capítulo menores, hojas linear-lanceoladas, ápice agudo.....*Acmella glaberrima*	23
32(29'). Hojas sin una disposición particular a lo largo del tallo..... .....*Symphyotrichum squamatum*	
32. Hojas opuestas.....33	24
33(32'). Capítulos con flores amarillas, la liguladas de hasta 3 cm de largo..... .....*Bidens laevis*	
33'. Capítulos con flores blancas, las liguladas lineares, cortas.....*Eclipta prostrata*	
34(30'). Lámina ovada, en su mayoría de entre 5-20 cm de largo. Inflorescencia una espiga muy densa... ..... *Plantago major*	25
34'. Lámina oblonga a linear-lanceolada, la mayoría menores de 5 cm de largo flores en racimos laxos 35	
35(34'). Hojas 4-6 por verticilos..... *Sherardia arvensis*	26



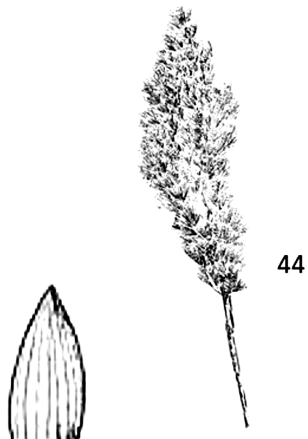
35’. Hojas no dispuestas en verticilos.....36	
36(35’). Flores reunidas en grupos globosos a lo largo del tallo, planta aromática..... .....*Mentha pulegium*	
36’. Flores solitarias o en grupos de pocas flores, plantas no aromáticas.....37	
37(36’). Hojas lineares, dispuestas apretadas a lo largo del tallo.....38	
37’. Hojas de otra forma, dispuestas de manera suelta.....39	
38(37). Hojas lineares, ápice agudo, flores pedunculadas.....*Linum bienne*	
38’. Hojas lineares, ápice obtuso, flores sésiles en la axila de la hojas..... .....*Lythrum hyssopifolia*	27
39(37’). Hojas no mayores de 5 mm, planta delicada, rastrera..... *Callitriche terrestris*	
39’. Hojas mayores de 5 mm, plantas fuertes, erectas.....40	
40(39’). Hojas de forma triangular, con 3-5 lóbulos, el central agudo..... *Anoda cristata*	28
40’. Hojas lanceoladas a linear-lanceoladas hasta espatuladas.....41	
41(40’). Hojas alternas..... *Myosotis discolor*	29
41’. Hojas opuestas.....42	30
42(41’). Hojas de hasta 1 cm de largo, decusadas, plantas pequeñas, gráciles..... .....*Lindernia dubia*	31
42’. Hojas mayores, plantas medianas a grandes, fuertes.....43	
43(42’). Hojas mayores de 3 cm de largo, flores sésiles en la axila de las hojas..... .....*Ammannia latifolia*	
43’. Hojas menores, flores sobresalientes de las hojas.....44	
44(43’). Flores con tubo de 1-2 cm de largo, frutos lineares que se abren a lo largo..... .....*Epilobium ciliatum*	
44’. Flores con tubo de 5-6 mm de largo, fruto una cápsula redonda..... .....*Mecardonia procumbens*	
45(14’). Flores en espiguillas reunidas en varias cabezuelas densas, ovadas-orbiculares, que parten de un punto y están rodeadas de 3-7 hojas (brácteas) lineares, de entre 5-35 cm de largo.....46	32
45’. Flores en espiguillas cilíndricas, compactas o interrumpidas, solitarias o a veces en grupos, con brácteas cortas o sin ellas.....49	
46(45). Espiguillas de forma lanceoladas formando una cabezuela de hasta 11 mm de diámetro .....*Cyperus difformis*	



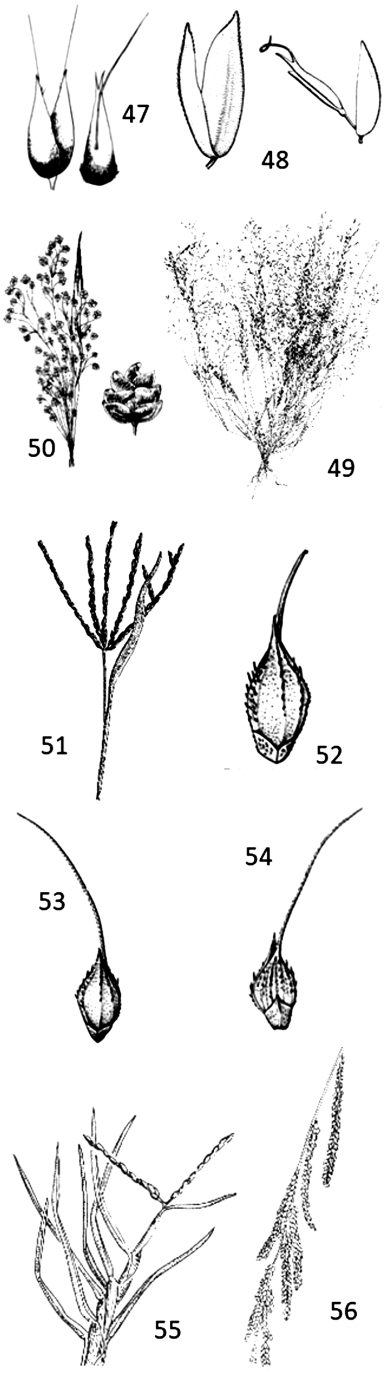
46’. Espiguillas oblongas o filiformes, agrupadas en una cabezuela mayores de 11 mm de diámetro 47	
47(46’). Espiguillas de forma oblonga..... *Cyperus eragrostis*	33
47’. Espiguillas de forma filiforme..... 48	
48(48’). Cabezuela de forma oblonga, laxas, abierta, espiguillas de color castaño claro, de alrededor de 0,6 mm de largo.....*Cyperus rigens*	
48’. Cabezuela de forma ovada, compacta, espiguillas de color castaños oscuro, de más de 1 cm de largo .....*Cyperus rotundus*	
49(44’). Tallos de sección triangular (Cyperaceae).....50	34
49’. Tallos de sección cilíndrica (Juncaceae y Poaceae).....54	35
50(49). Espiguillas agrupadas, de aspecto de umbelas.....51	
50’. Espiguillas solitarias, cilíndricas, oblongo-lanceoladas.....52	36
51(50). Espiguillas compactas, algo laterales, reunidas apretadas, acompañadas de una bráctea.....*Schoenoplectiella mucronata*	37
51’. Espiguillas laxas, de aspecto apical, reunidas en grupos abiertos, no acompañadas por brácteas evidentes.....*Schoenoplectus californicus* var. *californicus*	
52(49’). Planta con numerosas hojas basales.....*Carex brongniartii*	
52’. Plantas sin hojas basales, solo el tallo que lleva la espiga.....53	
53(52’). Tallos con tabiques transversales, espiguilla de 1-2,5 cm.....*Eleocharis montana*	38
53’. Tallos sin tabiques transversales, espiguilla de 0,9-1,5 cm...*Eleocharis macrostachya*	
54(48’) Inflorescencia en lo largo del tallo o en manojos laterales.....55	
54’. Inflorescencia en panoja, panícula, espigas (Poaceae)..... 56	
55(54). Planta anual con tallos con hojas. Flores dispuestas a lo largo del tallo de forma espaciada.....*Juncus bufonius*	39
55’. Planta perenne, con tallos sin hojas. Flores en manojos laterales, numerosas.....*Juncus procerus*	40
56(54’). Inflorescencia una panícula laxa, abierta o más o menos contraída, a veces difusa, o formada por racimos espiciformes alternos o digitados 57	
56’. Inflorescencia una espiga o una panícula espiciforme o capitada 80	
57(56). Espiguillas 1-floras 58	
57’. Espiguillas con 2 o más flores 62	



58(57). Espiguillas se desprenden con una parte o todo el pedicelo 59	
58'. Espiguilla no se desprenden con una parte o todo el pedicelo 60	
59(58). Glumas aristadas, aristas de las glumas de 2-5 mm de largo .... *Polypogon monspeliensis*	41
59'. Glumas sin aristas o sólo mucronadas, con la quilla con escabrosidades de 0,2-0,5 mm de largo ..... *Polypogon chilensis*	42
60(58'). Lemma pubescente, aristada; arista dorsal inserta en el tercio medio o superior; plantas cespitosas, anuales o perennes, sin rizomas ni estolones .....*Lachnagrostis filiformis*	
60'. Lemma glabra, sin arista; plantas con rizomas o estolones 61	
61(60'). Espiguillas de 1,5-2 mm de largo; quilla de las glumas con escabrosidades tiesas y brillantes; plantas estoloníferas ..... *Agrostis stolonifera* var. *palustris*	43
61'. Espiguillas de 2-2,5 mm de largo; quilla de las glumas con escabrosidades poco evidentes; plantas rizomatosas ..... *Agrostis stolonifera* var. *stolonifera*	
62(57'). Plantas de hasta 4 m de alto; láminas foliares de hasta 6 cm de ancho; panícula amplia, de hasta 45 cm de largo ..... *Phragmites australis*	44
62'. Plantas no mayores de 1 m de alto; láminas foliares menores de 6 cm de ancho; panícula generalmente menor de 30 cm de largo 63	
63(62'). Panícula abierta o contraída, más o menos piramidal o difusa..... 64	
63'. Panícula formada por racimos espiciformes 72	
64(63). Espiguillas comprimidas dorsalmente, de contorno ovoide..... .....*Panicum dichotomiflorum*	45
64'. Espiguillas comprimidas lateralmente, lanceoladas, linear-lanceoladas u oval-lanceoladas..... 65	
65(64'). Glumas reducidas a dos pequeños lóbulos en el ápice de los pedicelos o nulas; espiguilla 3-floras, los dos antecios inferiores estériles, el superior fértil, hermafrodita con 6 estambres ..... *Oryza sativa* fma. *spontanea*	
65'. Glumas bien desarrolladas; espiguillas (1-) 2-plurifloras, con todos los antecios férfiles 66	
66(65'). Glumas tan largas o más largas que el conjunto de las flores 67	
66'. Glumas menores que el conjunto de las flores 69	
67(66). Espiguillas de 15-28 mm de largo ..... *Avena fatua*	46
67'. Espiguillas menores de 5 mm de largo 68	



68(67'). Espiguillas de 2,5-3,5 mm; lemmas aristadas; aristas de 2-5 mm de largo, geniculadas y retorcidas, insertas en el tercio medio del dorso de la lemma..... .....*Aira caryophyllea*	47
68'. Espiguillas de 4-5 mm de largo; lemma del antecio inferior mútica, la del antecio superior con arista subapical con forma de gancho ..... *Holcus lanatus*	48
69(66'). Panícula difusa de 2,5-8 cm de ancho ..... *Eragrostis pilosa*	49
69'. Panícula contraída o piramidal, generalmente menor de 5 cm de ancho 70	
70(69'). Panícula abierta, piramidal; glumas acorazonadas, glabras; lemmas glabras ..... *Briza minor*	50
70'. Panícula contraída; glumas lanceoladas 71	
71(70'). Espiguillas comprimidas lateralmente; glumas y lemmas pubescentes; lemmas con aristas de hasta 7 mm de largo; plantas anuales de suelos secos o frescos ..... *Bromus hordeaceus*	
71'. Espiguillas cilíndricas; glumas y lemmas glabras; lemmas sin aristas; plantas perennes acuáticas o palustres ..... *Glyceria multiflora*	
72(63'). Espiguillas lanceoladas; plantas anuales; panícula digitada ....*Digitaria sanguinalis*	51
72'. Espiguillas ovoides, plantas anuales o perennes; panícula no digitada..... 73	
73(72'). Plantas anuales 74	
73'. Plantas perennes 77	
.....	
74(73). Espiguillas sin aristas, a veces mucronadas ..... *Echinochloa colona*	52
74'. Espiguillas aristadas 75	
75(74'). Espiguillas de 4-5 mm de largo ..... *Echinochloa oryzoides*	
75'. Espiguillas de 2,4-3,6 mm de largo..... 76	
76(75'). Espiguillas ovoides a anchamente elipsoides, de 3-3,6 x 1,5-2 mm; antecio superior de 3-3,4 x 1,4-1,8 mm; cariopsis de 1,8-2 x 1,2-1,6 mm.....*Echinochloa crus-galli*	53
76'. Espiguillas angostamente elipsoides, de 2,4-3 x 0,9-1,4 mm; antecio superior de 1,8-2,4 x 0,8-1,2 mm; cariopsis de 1,2-1,6 x 0,7-1,1 mm .....*Echinochloa crus-pavonis*	54
77(73'). Inflorescencia compuesta por sólo 2 racimos ..... *Paspalum distichum*	55
77'. Inflorescencia compuesta por varios (2-10) racimos 78	
78(77'). Antecio superior igual o ligeramente más corto que la gluma superior y la lemma inferior ..... *Paspalum dasypleurum*	56



78’. Antecio superior 0,6-1,2 mm más corto que la gluma superior y la lemma inferior 79	
79(78’). Inflorescencias con (7-) 10-17 racimos; espiguillas de 1,8-2,8 mm de largo ..... *Paspalum urvillei*	57
79’. Inflorescencias con 2-5 racimos; espiguillas de 2,8-4 mm de largo .... *Paspalum dilatatum*	
80(56’). Inflorescencia una panícula espiciforme..... 81	
80’. Inflorescencia una espiga o racimo 84	
81(80). Espiguillas lateralmente comprimidas, sin setas involucrales..... 82	
81’. Espiguillas dorsalmente comprimidas, rodeadas de setas involucrales 83	
82(81). Panícula subcapitada de 1-4 cm de largo, formada por pares de espiguillas dimorfas, estériles y fértiles; glumas no aladas; entrenudos basales no bulbosos .....*Cynosurus echinatus*	58
82’. Panícula espiciforme de 5-15 cm de largo; glumas aladas; entrenudos basales sub-bulbosos .....*Phalaris aquatica*	59
83 (81’). Plantas anuales; espiguillas de 3 mm de largo.....*Setaria pumila*	60
83’. Plantas perennes; espiguillas de 2-2,8 mm de largo .....*Setaria parviflora*	
84(80’). Espiguillas con una sola gluma ..... *Lolium perenne*	61
84’. Espiguillas con dos glumas 85	
85(84’). Espiguillas tres por nudo, 1-floras .....*Hordeum marinum*	62
85’. Espiguillas dos por nudo, 2-3-floras.....*Taeniatherum caput-medusae*	63

Descripción de las malezas presentes en el cultivo de arroz

Las malezas presentes en el cultivo del arroz están ordenadas, primeramente, por la familia a la que pertenecen; y luego, dentro de cada familia reciben un orden alfabético.

La descripción de cada maleza está basada, principalmente, en Ormeño (1983), San Martín y Ramírez (1983), Matthei et al. (1995) y Urrutia et al. (2017).

Familia Alismataceae

Alisma lanceolatum With., hualtata, llantén de agua.

Hierbas perennes, acuáticas, arraigadas al sustrato, con hojas y flores emergentes en la superficie del agua. Hojas largamente pecioladas, de 5-10 cm de largo. Láminas linear-lanceoladas, de 5-15 cm de largo, ápice agudo, base atenuada. Flores en ramas dispuestas en verticilos. Flores hermafroditas de 6-8 mm de diámetro, con 3 sépalos y 3 pétalos de color rosado. El fruto es un aquenio (con una sola semilla) que se dispersa por el agua.

Especie nativa de Europa, Asia y norte de África. Se encuentra a orillas de ríos y cuerpos de aguas lentas.

Alisma plantago-aquatica L., hualtata, llantén de agua.

Hierbas perennes, acuáticas, arraigadas al sustrato, con hojas y flores emergentes en la superficie del agua. Hojas largamente pecioladas, de 10-25 cm de largo. Lámina oblonga, ovado-elíptica a ovado-lanceolada, de 5-20 cm de largo, ápice agudo o redondeado, base cordada a redondeada. Flores en ramas dispuestas en verticilos. Flores hermafroditas con 3 sépalos y 3 pétalos de color blanco a lila. El fruto es un aquenio (una sola semilla), que se dispersa por el agua.

Especie de origen europeo. En Chile es común en cuerpos de agua de poca profundidad, entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos.

Sagittaria montevidensis Cham. & Schltdl. subsp. *chilensis* (Cham. & Schltdl.) Bogin, lengua de vaca, rosa de agua, cola de golondrina, flecha de agua.

Hierbas perennes, acuáticas, arraigadas al sustrato, con hojas y flores emergentes en la superficie del agua. Hojas sumergidas, a veces solo lineares. Las emergentes con pecíolo de 20-30 cm. Láminas de 5-8 cm de largo, sagitadas (con forma de flecha). Flores dispuestas de a 3 a lo largo del tallo floral, con 3 sépalos y 3 pétalos redondos de color blanco con una mancha oscura en la base.

Especie nativa de América. Se distribuye entre el Maule y Chiloé, en cuerpos de agua lénticos.

Familia Apiaceae

Cyclospermum leptophyllum (Pers.) Sprague

Hierba anual con tallos de hasta 60 cm de alto. Hojas de 1-10 cm de largo, con 3-4 divisiones divididas, a su vez, en varios segmentos lineares, muy finos. Flores en umbelas numerosas, en la axila de las hojas, con 3-5 radios de 1-2 cm de largo. Flores sin cáliz, con pétalos muy pequeños, de forma elíptica. Fruto recorrido por costillas muy finas.

Maleza sudamericana, ampliamente difundida en el país. Está presente en cultivos cerealeros, principalmente trigo y arroz, entre las Regiones de Atacama y Los Lagos. También en el Archipiélago Juan Fernández.

Eryngium rostratum Cav. Nombre comunes: caucha, cadilla.

Hierba perenne, con tallos de 10-20 cm de alto, estriados. La mayoría de las hojas están en la base, con el margen partido, espinoso, de 2-20 cm de largo. Flores en capítulos densos de forma ovoide, de 1-1,5 cm de largo, rodeados de hojitas punzantes. Cáliz formado por 5 dientes agudos, pétalos lineares, de color blanco.

Especie sudamericana, principalmente de praderas, entre las Regiones de Valparaíso y Biobío. Su presencia es ocasional en los pretiles de cultivos arroceros.

Hydrocotyle ranunculoides L.f., hierba de la plata, tangue.

Tallos delgados, con estolones de donde salen hojas en grupos de 2-3, con lámina algo redonda a reniforme, con 5-6 lóbulos, con el margen con dientes redondos.

Especie nativa. Crece entre las Regiones de Coquimbo y Los Ríos, en el borde de canales, esteros y arroyos, y en el cultivo de arroz.

Familia Asteraceae

Acmella glaberrima (Hassl.) R.K. Jansen.

Hierba perenne, con tallos de hasta 40 cm de alto. Hojas linear-lanceoladas, enteras, opuestas, de 1,9 a 7,0 cm de largo x 0,3 a 1,5 cm de ancho. Pecíolo muy corto y ápice agudo. Tallos florales de 8-19 cm de largo que terminan en un capítulo menor de 2 cm de diámetro, de forma ovoide, acompañado por 12-24 brácteas lineares. Flores de color amarillo. El fruto corresponde a un aquenio de 1,5-2,4 mm de largo.

Planta americana de lugares húmedos. Presente en cultivo de arroz en la provincia de Linares, Región del Maule.

Ambrosia artemisiifolia Meyen & Walp. ex Meyen, tomatillo, democracia.

Hierba anual, con tallos de hasta 1 m de alto, ramificados, pubescentes. Hojas de forma ovada, alternas, profundamente partidas, con segmentos lanceolados, algo lobados, agudos. Flores unisexuales, en capítulos separados, los masculinos en racimos terminales y los femeninos en la parte inferior.

Especie centroamericana, actualmente cosmopolita. Es una maleza muy seria en cultivos agrícolas diversos. Sus frutos se dispersan por el agua. Es planta sumamente alergénica. En Chile es abundante en las Regiones del Maule, Ñuble y Biobío.

Bidens laevis (L.) Britton, Sterns & Poggenb., amor seco, falso té.

Hierba perenne, con tallos de 30-100 cm de alto. Hojas linear-lanceoladas a lanceoladas, de 5-15 cm de largo, sésiles, opuestas, ápice acuminado, base atenuada, margen aserrado. Capítulos numerosos, largamente pedicelados. Flores de color amarillo, las marginales con lígula de 2-3 cm x 8 mm, las centrales tubulosas. El fruto es un aquenio provisto de 2-4 aristas con pelos retrorsos que facilitan su dispersión por animales.

Especie originaria de América del Norte. Se encuentra en Chile en lugares húmedos, como orillas de canales, donde forma grandes poblaciones. También está en el cultivo del arroz.

Coleostephus myconis (L.) Cass., margarita amarilla.

Hierba anual, con tallos de hasta 50 cm de alto. Hojas simples, obovado-espatuladas, de 2,5 cm de largo, margen dentado, ápice obtuso, alternas, con la base algo abrazadora al tallo. Flores marginales con lígula de 6-15 mm de largo, de color amarillo, las centrales de color algo más anaranjado. El fruto es un aquenio. Los aquenios de las flores fértiles tienen un apéndice en la base y sin pappus.

Especie europea. Constituye una maleza muy frecuente en cultivos de arroz. Restringida a la Región del Maule.

Eclipta prostrata (L.) L., yerba de tago.

Hierba anual, con tallos flexuosos. Hojas oblongo-lanceoladas, de 2,5 a 10,0 cm de largo, agudas, enteras o aserradas, opuestas, base enangostada. Flores en capítulos pequeños, solitarios o de a dos en la axila de las hojas, pedunculados, de alrededor de 4 mm de diámetro. Flores de color blanco con lígulas lineares, cortas.

Maleza cosmopolita de importancia menor, crece de preferencia en países tropicales y templados. En Chile parece estar restringida al cultivo de arroz y algunos hábitats húmedos entre las Regiones de Valparaíso y del Maule.

Sonchus oleraceus L., ñilhue, ñilhue caballuno, cerrajilla.

Hierba anual con tallo de hasta 1,5 m de alto, anguloso, hueco. Hojas enteras a partidas, glabras, de 5-15 cm de largo, con lóbulos triangulares, dentados, el apical más ancho que los laterales. Capítulos pocos, de hasta 2,5 cm de diámetro, sólo con flores liguladas, de color amarillo.

Especie europea, actualmente cosmopolita. Crece en todo el país en ambientes ruderales y cultivados.

Symphyotrichum squamatum (Spreng.) G.L. Nesom

Hierba anual o bienal, con tallos de 30-100 cm de alto, densamente hojosos, ramificados. Hojas lineares a oblanceolado-lineares, de 3-14 cm x 3-20 mm, enteras, ápice agudo. Capítulos numerosos, dispuestos en panojas amplias, de 4-5 mm de diámetro.

Especie nativa de Sudamérica. Matthei et al. (1995) la cita como maleza común en ambientes ruderales (cerca de las casas) y cultivados (praderas, huertos), incluyendo el cultivo de arroz.

Familia Boraginaceae

Myosotis discolor Pers.

Hierba anual, con tallos de 10-30 cm de alto, pubescentes. Hojas angostamente elípticas a espatuladas, de 5-20 x 3-5 mm, sésiles, agudas, con pelos tiesos. Flores a lo largo del tallo, numerosas, más densas hacia la parte superior. Cáliz con cubierto de pelos como crochet, corola de color amarillo al inicio y luego tornándose azul violeta.

Especie de origen europeo, crece desde la Región del Maule al sur. También en Archipiélago Juan Fernández. Es planta de lugares húmedos y maleza del arroz.

Familia Cyperaceae

Carex brongniartii Kunth, cortadera.

Hierba perenne con rizoma horizontal, tallos de sección triangular, de hasta 90 cm de alto. Hojas basales numerosas, a veces sobrepasan el tallo, lineares, con el margen áspero. Espiguillas en glomérulos formando una espiga cilíndrica, ovado-lanceolada, compacta, de 1,4-5,0 cm de largo, acompañada de una bráctea linear más corta que la espiga.

Especie de origen americano, nativa en Chile. Crece desde la Región del Libertador Bernardo O'Higgins a Los Lagos. Frecuente en el cultivo de arroz.

Cyperus difformis L., cortadera, lleivún.

Hierba perenne. Flores en espiguillas reunidas en varias cabezuelas, ovadas-orbiculares, que parten de un punto y están rodeadas de 3 hojas (brácteas) lineares, dos de las cuales alcanzan un largo mayor, de hasta 19 cm de largo. Espiguillas de forma lanceolada formando una cabezuela densa de hasta 1,1 cm de diámetro.

Planta originaria de Europa. Se le encuentra desde la Región del Libertador Bernardo O'Higgins a la del Biobío. Crece en el cultivo del arroz.

Cyperus eragrostis Lam., cortadera, lleivún, malcocho, chupa.

Hierba perenne. Flores en espiguillas reunidas en varias cabezuelas, ovadas-orbiculares, que parten de un punto y están rodeadas de 5 a 7 hojas (brácteas) lineares, que llegan hasta 34 cm de largo. Espiguillas oblongas, agrupadas en una cabezuela algo laxa y abierta, mayores de 1,1 cm de diámetro.

Originaria de América tropical. En Chile es una maleza ampliamente distribuida desde la Región de Atacama a la de Los Ríos, y también en cultivos de hortalizas y sitios eriazos.

Cyperus rigens J. Presl & C. Presl

Hierba perenne. Flores en espiguillas reunidas en varias cabezuelas, oblongas, de color castaño claro, con pedúnculos largos, que parten de un punto y están rodeadas de 3 hojas (brácteas) lineares, de hasta 30 cm de largo. Espiguillas filiformes, agrupadas en una cabezuela compacta, de alrededor de 0,6 mm de largo.

Especie sudamericana. Maleza muy seria en el cultivo del arroz. Crece en las Regiones de Arica y Parinacota y Antofagasta, y luego desde la Región Metropolitana a la de Los Lagos.

Cyperus rotundus L., chufa roja, coquilla.

Hierba perenne. Flores en espiguillas reunidas en pocas cabezuelas, ovadas, de color castaño oscuro, con pedúnculos largos, que parten de un punto y están rodeadas de 3 hojas (brácteas) lineares. Espiguillas filiformes, agrupadas en una cabezuela laxa, abierta, mayores de 1,1 cm de largo.

Especie originaria de Asia, pero presente en casi todo el mundo. Crece desde la Región de Valparaíso y Metropolitana, a orilla de canales y acequias.

Eleocharis macrostachya Britton, junco de espiga, quilenen.

Hierba perenne, sin hojas basales, solo el tallo que lleva la espiga. Tallos trígonos, sin tabiques transversales. Espiguillas solitarias, cilíndricas, oblongo-lanceoladas, de 0,9-1,5 cm.

Especie de origen americano, crece principalmente como maleza del arroz.

Eleocharis montana (Kunth) Roem. & Schult.

Hierba perenne, sin hojas basales, sólo el tallo que lleva la espiga. Tallos trígonos, con tabiques transversales. Espiguillas solitarias, cilíndricas, oblongo-lanceoladas, de 1,0 a 2,5 cm.

Originaria de América del Sur. En Chile crece desde la Región del Maule a La Araucanía.

Schoenoplectiella mucronata (L.) J. Jung & H.K. Choi, serrada menor.

Hierba anual o a veces perenne, con tallos trígonos en sección transversal, de hasta 90 cm de alto. Espiguillas 4-6 compactas, sésiles, ovadas, reunidas apretadas, no ramificadas, formando una cabezuela, algo lateral, acompañadas de una bráctea lanceolada de 3-10 cm de largo que sobrepasa las espiguillas.

Especie eurasiática. Se encuentra en zonas tropicales, subtropicales y templado-cálidas de todo el mundo. Introducida en Chile en las Regiones del Maule y Ñuble como maleza de arroz.

Schoenoplectus californicus (C.A. Mey.) Soják var. *californicus*

Hierba perenne con tallos trígonos en sección transversal, de hasta 170 cm de alto. Espiguillas laxas, pedunculadas, ovadas, reunidas de manera laxa, de aspecto apical, acompañadas de una bráctea lanceolada que no sobrepasa las espiguillas.

Amplia distribución a lo largo del país. Crece en lugares húmedos, pantanos, orillas de esteros, ríos, lagunas, vegas y gualves.

Familia Hydrocharitaceae

Elodea potamogeton (Bertero). Espinosa, luchecillo, luche, huiro, peste de agua.

Hierba perenne, acuática, sumergida, arraigada al sustrato, con tallos de hasta 2 m de largo, muy delgados. Hojas lanceoladas, lineares, de 4-23 x 0,6-4,9 mm, sésiles, ápice agudo u obtuso, dispuestas de 2 a 3 en verticilos. Flores con pedicelos de hasta 12 cm de largo que sobresalen del agua en la floración.

Originaria de Sudamérica. Maleza del arroz, presente también en canales, lagos y lagunas.

Familia Fabaceae

Lotus tenuis Waldst. & Kit. ex Willd., lotera de hoja angosta.

Hierba perenne, con tallos de hasta 60 cm de largo, erectos o caídos. Hoja compuesta con 2 folíolos basales y 3 apicales, lanceolados a lineares, margen entero. Flores 2-6 reunidas en una umbela, de color amarillo a anaranjado. El fruto es una legumbre cilíndrica, de 10-25 mm de largo.

Especie de origen europeo. En Chile crece desde la Región de Valparaíso a la de Los Lagos, en lugares húmedos.

Familia Geraniaceae

Geranium molle L., geranio silvestre.

Hierba anual, con tallos de hasta 50 cm de largo, caedizos, ramosos. Hojas con pecíolos de hasta 20 cm de largo, en las superiores más cortos. Lámina de 1,5-4 cm de largo, profundamente dividi-

das en 5-7 lóbulos obovados, cuneados, cada uno con 3 lóbulos cortos. Pedúnculos florales con dos flores, con cáliz y pétalos en número de 5, flores de color morado a rosado.

Especie de origen europeo. Se le puede encontrar desde la Región de Coquimbo hasta la de Magallanes y de la Antártica Chilena.

Familia Juncaceae

Juncus bufonius L., junquillo.

Planta anual, con tallos ramificados, de hasta 45 cm de alto. Hoja linear, plana de hasta 12 cm de largo. Flores dispuestas a lo largo del tallo, separadas.

Especie cosmopolita. En Chile tiene una amplia distribución desde la Región de Antofagasta a la de Magallanes y de la Antártica Chilena, en terrenos pantanosos, orilla de vega, esteros y también en suelos secos.

Juncus procerus E. Mey., junco, junquillo, hierba de la vaca.

Planta perenne, con tallos de hasta 1,5 m, de sección redonda, rectos y lisos. Hojas sólo como vainas basales reducidas. Inflorescencia algo lateral, con muchas flores. Bráctea recta rígida, aguda, que sobresale de la inflorescencia.

Especie originaria de América del Sur. En Chile se distribuye de la Región del Libertado Bernardo O'Higgins a la de Magallanes y de la Antática Chilena y en el Archipiélago de Juan Fernández, en lugares húmedos.

Familia Lamiaceae

Mentha pulegium L., poleo.

Hierba perenne, aromática, con tallos de 10-40 cm de alto. Hojas angostamente elípticas, de 8-30 x 4-12 mm, con pecíolo corto, base atenuada, margen entero o dentado, pubescentes. Flores de color celeste, reunidas en grupos globosos a lo largo del tallo.

Especie europea, introducida en Chile, donde se distribuye ampliamente, en especial en sitios húmedos. Es muy utilizada como planta medicinal y aromática.

Familia Linaceae

Linum bienne Mill., lino, linaza.

Hierba anual, con tallos de hasta 60 cm de alto, delgados, ramificados. Hojas lineares de 0,5-1,5 mm de ancho, ápice agudo. Flores pedunculadas, sépalos ovados, desiguales, los internos con el margen ciliado, los externos con el margen entero. Pétalos 2-3 veces más largos que los sépalos, de color azul.

Originaria de Europa. En Chile se le encuentra entre las Regiones de Antofagasta y Los Lagos.

Familia Linderniaceae

Lindernia dubia (L.) Pennell

Hierba anual, pequeña, grácil, con tallos de hasta 25 cm de largo, ramificados. Hojas ovadas, de

0,5-1,2 cm de largo, opuestas, decusadas, abrazadoras. Flores solitarias en la axila de las hojas, corola bilabiada de color blanco a azulino.

Especie americana. Se distribuye desde la Región Metropolitana a la de Los Ríos, típicamente en lugares húmedos.

Familia Lythraceae

Ammannia latifolia L.

Hierba anual, con talos de hasta 1 m de alto. Hojas linear-lanceoladas a oblongas, de 1,5-7,0 x 0,4-1,2 cm, sésiles. Flores sésiles en la axila de las hojas, solitarias o hasta 10 unidades. Cáliz globoso, partido en 4, pétalos ausentes. El fruto es una cápsula globosa, de 4 mm de diámetro.

Especie acuática de origen americano. Se encuentra en cultivos de arroz, en la Región del Maule.

Lythrum hyssopifolia L., romerillo, yerba del toro.

Hierba anual, con tallos de 10-30 cm de alto. Hojas lineares, sésiles, de 8-20 x 1-3 mm, ápice obtuso, dispuestas apretadas a lo largo del tallo. Flores sésiles, solitarias en la axila de las hojas. Cáliz tubuloso, de 4 mm de largo, corola de 2,5 mm de largo, de color rosado.

Especie europea introducida en Chile, donde crece entre las Regiones de Valparaíso y Los Lagos, en cultivos de arroz, praderas húmedas, orillas de canales y otros sectores húmedos.

Familia Malvaceae

Anoda cristata (L.) Schltdl., malvilla, malva.

Hierba anual con tallos de 30-50 cm de alto, pubescentes. Hojas con pecíolo de 1-4 cm de largo, lámina de forma triangular, con 3-5 lóbulos, el central agudo, margen dentado, pubescentes. Flores solitarias, axilares, cáliz pubescente, corola de color azul, mayor que el cáliz.

Especie americana que crece en Chile desde la Región de Antofagasta hasta La Araucanía y también en el Archipiélago Juan Fernández. Se encuentra en diversos cultivos y en los pretiles de arrozales.

Hibiscus trionum L.

Hierba anual, con tallo de 30-60 cm de alto, con pelos rígidos. Hojas con pecíolo de 2-4 cm de largo, lámina superiores divididas en 3-5 segmentos de margen aserrado, el central de mayor tamaño. Flores solitarias, axilares, de color crema o amarillo pálido, y con la base púrpura. El fruto es una cápsula ovoide, hirsuta, cubierta por el cáliz concrescente.

Especie europea introducida en Chile donde se encuentra presente en el centro-sur, asociada a cultivos agrícolas entre las Regiones de Maule y Biobío.

Familia Onagraceae

Epilobium ciliatum Raf.

Hierba perenne con tallos de 20-60 cm de alto, ramificados, estriados, angulosos, pubescente y glandulosos. Hojas lanceoladas a angostamente ovadas, de 1-3 cm de largo, acuminadas, margen

aserrado. Flores en racimos hojosos. Flores erectas, de color blanco o rosado, con tubo de 1-2 cm de largo. El fruto es una cápsula linear de 3-6 cm de largo, que se abre longitudinalmente.

Especie americana, común en calles, sitios eriazos y, en general, en lugares húmedos. Maleza en arroz.

Ludwigia peploides (Kunth) P.H. Raven subsp. *montevidensis* (Spreng.) P.H. Raven, pasto de la rana.

Hierba perenne, acuática, arraigada al sustrato. Tallos de 30-60 cm de largo. Hojas y flores emergentes en la superficie del agua. Lámina obovado-lanceolada, alternas. Flores solitarias de color amarillo, en la axila de las hojas, tubo floral de 1,0-1,5 cm de largo, cilíndrico, pubescente.

Especie sudamericana, de amplia distribución en cuerpos de agua del país. Es especie anfibia y sus hojas cambian de forma según estén sumergidas o emergentes. Es maleza frecuente en arrozales.

Familia Plantaginaceae

Callitriche terrestris Raf. subsp. *turfosa* (Bertero *emend*. Hegelm.) Bacigalupo, huenchecó.

Hierba anual de tallos gráciles, rastreros, formando matitas densas de color verde claro. Hojas espatuladas, de 2 a 5 mm de largo, opuestas. Flores solitarias, dispuestas en la axila de las hojas, sin cáliz ni corola.

Especie americana, común en canales de regadío y cultivo de arroz.

Mecardonia procumbens (Mill.) Small

Hierba anual con tallos de 5-10 cm de largo, angulosos, algo alados. Hojas opuestas, elípticas, de 1-2 cm x 3-6 mm, margen con dientes pequeños en la parte superior. Flores solitarias, pedunculadas, con 3 sépalos externos ovados y 2 internos lineares, algo más cortos que los externos. Corola de color amarillo, tubular con líneas púrpura. El fruto es una cápsula redonda, de 4 mm de diámetro.

Especie originaria de América. Se extiende desde el este de U.S.A. hasta el centro-sur de Chile y Argentina. En Chile es una maleza de arroz en la provincia de Cauquenes, Región del Maule.

Plantago major L., llantén, huincallantén, llantén de hoja ancha.

Hierba perenne. Hojas en roseta, con pecíolo largo y acanalado, ovadas, de 5-20 x 4-15 cm, enteras, sinuadas o dentadas, con 3-7 venas, glabras. Flores dispuestas en espigas densas, de 4-15 cm de largo.

Especie de origen europeo, común en sitios húmedos. Tolera la compactación del suelo. Ha sido citada como maleza de numerosos cultivos y es planta de uso medicinal.

Familia Poaceae

Agrostis stolonifera L.

Hierba perenne, rizomatosa o estolonífera de 13-90 cm de alto, erecta o decumbente en la base, radicante en los nudos inferiores. Lígula de (0,5-) 1-3 (-6) mm de largo, membranácea. Láminas de 2-26 cm x 1,5-7,0 mm, planas. Panícula de 4-26 x 1-16 cm, laxa o contraída. Espiguillas de 1,5-2,6

mm de largo, 1-floras. Glumas subiguales, 1-nervias, glabras, la quilla escabrosa, agudas en el ápice. Lemma de 1,2-2,2 mm de largo, hialina, glabra, mútica, el ápice agudo o truncado, 3-5-nervia. Callo breve, con dos mechones laterales de pelos. Pálea de 0,6-1,1 mm de largo, hialina. Cariopsis de 1 mm de largo.

Originaria de Europa. Se encuentra en Chile desde la provincia de Iquique hasta la provincia de Tierra del Fuego (19°41'- 53°44' S), entre 3 y 3.410 m s.n.m. También está presente en la isla Robinson Crusoe del Archipiélago Juan Fernández y en Isla de Pascua (Rapa Nui).

var. ***palustris*** (Huds.) Farw.

Planta estolonífera.

Originaria de Europa. Se encuentra desde la provincia de Huasco hasta la provincia de Tierra del Fuego (28°31'- 53°21' S), desde el nivel del mar hasta 1.460 m de altitud, a orillas de caminos, dunas costeras y marismas.

var. ***Stolonifera***

Planta rizomatoza.

Especie de Europa, Asia y norte de África. En Chile crece en sectores húmedos, suelos arenosos y en bosques húmedos, desde la provincia de Iquique hasta la de Tierra del Fuego (19°41'- 53°44' S), desde el nivel del mar hasta los 3.000 m de altitud.

Aira caryophyllea L., aira.

Hierba anual de 4-15 (-40) cm de alto, erecta o algo geniculada. Lígula de 2-5 mm de largo, membranácea. Láminas de 0,5-5,0 cm x 0,3-1,0 mm, filiformes. Panícula de 2-10 cm de largo, oval, grácil, con ramas capilares. Espiguillas de 2,5-3,5 mm de largo, 2-floras, ovoides, pediceladas. Glumas subiguales. Lemmas más consistentes que las glumas, lanceoladas, el dorso redondeado, el ápice hialino biaristulado, aristadas; arista de 2-5 mm de largo, geniculada y retorcida, inserta en el tercio medio del dorso de la lemma, sobresale entre las glumas. Callo con pelos cortos de 0,5-1,0 mm de largo. Cariopsis de 1,0-1,5 mm de largo, ovoidea.

Especie europea, cosmopolita. Crece desde la provincia de Choapa hasta la provincia Antártica Chilena (31°46'- 54°55' S) y en el Archipiélago de Juan Fernández (islas Robinson Crusoe y Alejandro Selkirk), desde el nivel del mar hasta los 2.000 m de altitud.

Avena fatua L., avenilla.

Hierba anual de 30-160 cm de alto, erecta o decumbente. Lígulas de 3-6 mm de largo, agudas. Láminas de 10-45 cm de largo, planas, escabrosas. Panícula de 15-40 cm de largo, abierta o contraída, piramidal. Espiguillas 2-3-floras, de 15-28 mm excluidas las aristas, péndulas. Glumas de 15-28 mm de largo, subiguales. Lemmas de 14-28 mm, hirsutas a glabras, tricomas de 3-7 mm de largo, brevemente bidentada en el ápice, los dientes de 0,2-0,5 mm; arista de 30-40 mm, geniculada y retorcida. Cariopsis de 5-7 mm de largo, pilosa.

Especie de origen europeo. En Chile crece como maleza de cultivos agrícolas y áreas ruderales, entre las provincias de Limarí y Osorno (31°18'- 40°36' S), entre los 5 y los 2.800 m s.n.m.

Briza minor L., tembladerilla, pasto de la perdiz.

Hierba anual de 10-60 cm de alto, erecta o decumbente. Lígulas de 3-7 mm de largo, agudas, glabras. Láminas de 3-14 cm de largo, planas, glabras. Panícula de 3-15 cm de largo, abierta. Espiguillas de 2,5-3,5 mm de largo, triangular-ovadas a orbiculares, 3-8-floras; pedicelos capilares. Glumas de 2,0-2,5 mm, cordiformes, membranáceas, 3-5-nervias. Lemmas de 1,8-2,5 mm de largo, 7-9-nervias, con márgenes hialinos, el dorso con escasos pelos gruesos y translúcidos. Cariopsis de 0,85-1,0 mm de largo.

Nativa del Mediterráneo e introducida en Chile, crece entre la provincia de Limarí y la provincia de Osorno (30°40′- 40°59′ S). También en Archipiélago Juan Fernández e Isla de Pascua. Se le encuentra desde el nivel del mar hasta los 1.460 m de altitud.

Bromus hordeaceus L. (=*Bromus mollis* L.)

Hierba anual, de 15-50 cm. Lígulas de 1-2 mm de largo, membranáceas. Láminas de 10-20 cm, planas. Panícula de (3-) 5-8 (-12) cm, contraída, densa. Espiguillas de 10-15 mm, con (5-) 6-11 (-12) flores. Glumas pilosas. Gluma inferior de 5-6 mm, gluma superior de 6-7 mm. Lemmas de 7-9 mm de largo, aovadas, pubescentes. Arista de (5-) 6-7 mm, subapical, recta o ligeramente curvada. Cariopsis de 6-7 mm de largo, elipsoidal, anchamente surcada y adherida a la pálea y lemma.

Especie europea. En Chile crece desde la provincia de Choapa hasta la provincia de Tierra del Fuego (32°04′- 53°18′ S), desde el nivel del mar hasta los 2.000 m de altitud.

Cynosurus echinatus L., cola de zorro.

Hierba anual de 20-60 cm de alto. Lígula de 3-6 mm de largo, membranácea. Láminas de 5-20 cm de largo, planas. Panícula de 1,5-4,0 cm, densa, contraída, subcapitada, oblonga a ovada o globosa, unilateral. Espiguillas de 8-10 mm de largo, fértiles y estériles, 1-5-flores, comprimidas lateralmente. Espiguillas estériles ubicadas debajo de las fértiles y formadas por glumas y lemmas estrechas, linear-lanceoladas, rígidas, brevemente aristadas; arista de 2-4 mm de largo. Espiguillas fértiles con glumas hialinas, subiguales, persistentes, glabras, lanceoladas, 1-nervias, nervio escabroso continuado en arista corta. Lemma 5-nervia, rígida, con el dorso redondeado, escabroso en la mitad superior, ápice 2-dentado o entero y arista recta apical. Cariopsis de 3-4 mm.

Especie de origen europeo que crece entre las provincias de Valparaíso y Magallanes (32°47′- 53°10′ S), desde el nivel de mar hasta los 2.000 m de altitud.

Digitaria sanguinalis (L.) Scop., pata de gallina.

Hierba anual de 20-70 cm de alto. Lígula de 0,5-2,6 mm, membranácea. Láminas de 4-20 cm, lanceoladas. Panículas de 5-15 cm, digitadas, con 3-8 racimos. Espiguillas de 2,8-3,3 mm, elipsoides, ápice agudo, en grupos de 2. Gluma inferior pequeña, de 0,3-0,5 mm; gluma superior de 1/2 la longitud de la espiguilla. Lemma inferior 7-nervia, nervio medio distante de los laterales contiguos, nervios escabrosos en el tercio superior, glabra a ambos lados del nervio medio. Antecio superior tan largo como la lemma inferior, pajizo. Cariopsis de 1,5-2,0 mm.

Originaria de Europa. En Chile crece desde la provincia de Huasco hasta la provincia de Valdivia (28°30′- 39°53′ S). También en Isla de Pascua.

Echinochloa colona (L.) Link., hualcacho, hualcacho morado.

Hierba anual, de 10-90 cm de alto, erguidas o decumbentes, débiles. Láminas de 1,5-17,0 cm de largo, planas, linear-lanceoladas, glabras a esparcidamente pilosas. Lígula ausente. Inflorescencia una panícula contraída de 1,5-17,0 cm. Espiguillas de 2-3 mm de largo, anchamente elipsoides a obovoides, sin aristas.

Gluma superior y lemma inferior similares. Gluma inferior aovada, de 0,9-1,5 mm de largo, 1/2 o poco menos del largo de la espiguilla, híspida, abrazadora. Gluma superior de 1,9-2,6 mm de largo, híspida, con espínulas cortas sobre los nervios. Lemma inferior glumiforme. Pálea inferior lanceolada, de 1,9 x 0,5 mm. Flor inferior ausente. Antecio superior de 1,9-2,4 mm, ovoide, plano-convexo, pajizo, lustroso, de dorso giboso. Lemma superior acuminada, escabriúscula. Pálea superior de ápice reflexo, libre. Estambres 3, anteras de casi 1 mm de largo. Cariopsis de 1-2 mm de largo, ovoide.

Especie originaria de África y Asia tropical, introducida en Chile donde vive en suelos húmedos, y en cultivos de arroz, maíz, porotos y remolacha, entre las Regiones de Coquimbo y de La Araucanía.

Echinochloa crus-galli (L.) P. Beauv., hualcacho.

Hierba anual de 30-180 cm de alto. Láminas linear-lanceoladas, de 10-40 cm de largo, planas, glabras. Lígula ausente. Inflorescencia una panícula de 6,5-22,0 cm, a veces nutante; espiguillas en pares o en fascículos, dispuestas unilateralmente. Espiguillas ovoides a anchamente elipsoides, de 3,0-3,6 mm (sin las aristas), con pelos sobre los nervios y aristadas. Gluma superior y lemma inferior desiguales. Gluma inferior de 1,2-1,8 mm de largo, ovado-acuminada, 1/3-1/2 del largo de la espiguilla. Gluma superior de 2,5-3,6 mm de largo, caediza a la madurez dejando el dorso del antecio superior libre. Lemma inferior glumiforme; arista de hasta 2,5 cm de largo. Pálea inferior de 2,4-2,7 mm, lanceolada, glabra, membranácea, hialina. Flor inferior ausente. Antecio superior de 3,0-3,4 mm, ovoide a anchamente elipsoide, plano-convexo, pajizo, castaño claro, lustroso, con el dorso giboso. Lemma superior aristulada; arístula escabriúscula. Lodículas 2. Estambres 3, anteras de hasta 1 mm de largo. Cariopsis de 1,8-2,0 mm, ovoide; hilo punctiforme; embrión 2/3 del largo de la cariopsis

Especie cosmopolita principalmente de regiones templadas y tropicales, es una maleza de cultivos en más de 60 países entre los 50° N y 40° S (Holm et al. 1977). Crece también a orillas de caminos, sitios eriazos, canales etc. En cultivos de arroz es una de las malezas más importantes. Comprende dos variedades en Chile: var. *crus-galli* y var. *mitis*.

var. ***crus-galli***, hualcacho.

Se le encuentra distribuida entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos.

var. *mitis* (Pursh) Peterm., hualcacho morado, hualcacho negro.

Se distingue de la variedad *crus-galli* por las espiguillas sin aristas y con pálea inferior rudimentaria o hasta ½ del largo del antecio superior. Crece en ambientes similares a los de la variedad tipo entre las Regiones de Coquimbo y de Los Lagos.

Echinochloa crus-pavonis (Kunth) Schult., hualcacho, hualcacho blanco.

Hierba anual de 0,5-2,0 m de alto, erguida, simple o ramificada en los nudos inferiores. Láminas linear-lanceoladas, de 9-40 cm de largo, glabras. Inflorescencia una panícula de 9-30 cm de largo, angostamente elíptica, erecta o nutante, con las espiguillas dispuestas unilateralmente sobre 2 caras del raquis, en pares o fasciculadas. Espiguillas angostamente de 2,4-3,0 mm (sin las aristas),

elipsoides, pajizas o con tintes purpúreos, híspidas. Gluma inferior de 1,0-1,5 mm de largo, ovado-acuminada, 1/3-1/2 del largo de la espiguilla, híspida; gluma superior de 2,4-3,0 mm de largo, cortamente mucronada, escabrosa, caediza a la madurez, dejando libre el dorso del antecio superior. Lemma inferior glumiforme; arista de 0,2-1,5 cm de largo. Pálea inferior de 1,3-1,8 mm. Flor inferior ausente. Antecio superior de 1,8-2,4 mm, elipsoide, plano-convexo, con el dorso giboso, pajizo, castaño a la madurez, lustroso. Estambres 3, anteras de 0,7 mm de largo. Cariopsis de 1,2-1,6 mm; hilo punctiforme, embrión 2/3 del largo total de la cariopsis.

Especie pantropical, característica por su panícula nutante. Introducida en Chile desde muy temprano, donde se encuentra desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de la Araucanía. Crece en terrenos húmedos, arenosos y bajos, a orillas de ríos, en bordes de caminos y pantanos y es comúnmente invasora de cultivos de arroz.

Echinochloa oryzoides (Ard.) Fritsch, hualcacho blanco, hualcacho nortino.

Hierba anual, cespitosa, con cañas erectas, de 80 cm de alto. Lámina linear-lanceolada, de 10-40 x 0,6-1,0 cm, glabra. Inflorescencia terminal, espiciforme, contraída, de 8-10 x 1,0 cm; eje principal triquetro, con una cara aplanada, con largos pelos tuberculados; ramificaciones de primer orden 6-15, cortas. Espiguillas de 4-5 mm, dispuestas en pares sobre dos caras del raquis, unilateralmente, obovoides, plano-convexas. Gluma inferior de 1,8 mm de largo, ovada, acuminada, abrazadora, escabriúscula; gluma superior de 4-5 mm de largo, acuminada a cortamente aristada, equinulada hacia los márgenes. Lemma inferior largamente aristada; arista de 1,2-3,0 cm de largo, equinulada. Pálea inferior de 3,0 x 1,2 mm, lanceolada, hialina, los bordes escabrosos. Flor inferior ausente. Antecio superior de 2,9-3,3 mm, elipsoide, liso, lustroso, endurecido, piloso hacia el ápice de la lemma y pálea. Lemma superior 5-nervia. Pálea superior de ápice reflexo. Cariopsis de 2,6 mm de largo, castaña; hilo punctiforme; embrión 3/4 del largo de la cariopsis.

Especie europea introducida en Chile, donde crece en la región del Maule como maleza de arroz y otros en cultivos en terrenos bajos. Florece desde diciembre hasta abril.

Eragrostis pilosa (L.) P. Beauv.

Hierba anual, cespitosa, de 10-75 cm de alto; nudos y entrenudos glabros. Vainas más cortas que los entrenudos, glabras, con márgenes escabrosos. Lígulas de 0,3-0,6 mm, pilosas, con mechón de pelos largos a ambos costados. Láminas 2,3-15,8 cm de largo, planas a involutas, glabras, agudas. Panículas de 6,6-31,0 cm, laxas, ovadas, flexuosas, múltiples ejes floríferos, glabros, densamente espiculadas; ramas ascendentes, escabrosas, las basales de 3,0-11,5 cm; desarticulación de las espiguillas desde el ápice a la base; pulvínulos castaño oscuros, pilosos, pelos de hasta 3 mm. Espiguillas de 3,2-6,0 mm, linear-lanceoladas, 6-9-floras, verde-oliváceas, desarticulación de los antecios comenzando en la base; pedicelos largos, de 0,8-9,0 mm; raquilla persistente, glabra. Glumas de 0,4-1,4 mm de largo, lanceoladas, obtusas, desiguales, herbáceas, caedizas. Lemmas de 1,4-2,0 mm, ovadas, agudas, herbáceas. Páleas de 1,0-1,6 mm, elípticas, ápice obtuso y finamente ciliolado, herbáceas, normalmente 3/4 de la longitud de la lemma, glabras, quillas escabrosas, caedizas. Anteras de 0,2-0,3 mm. Cariopsis de 0,6-1,0 mm, castaño-clara, finamente reticulada, oblonga; mácula embrional igual a la mitad de su largo; surco ventral ausente.

Especie originaria de Europa. En Chile se encuentra desde la Región de Coquimbo hasta la Región de Ñuble.

Glyceria multiflora Steud.

Hierbas acuáticas o palustres, de 30 a 70 cm de alto, arraigadas en los nudos. Lígula de 6-8 mm de largo, membranácea. Láminas de 10-30 cm de largo, planas, glabras. Panícula de hasta 30 cm de

largo, contraída, con las ramas aproximadas al eje. Espiguillas de 15-20 (-25) mm de largo, cilíndricas, con 10-12 (-15) flores. Glumas desiguales, glabras, obtusas, 1-nervias. Gluma inferior de 2-3 mm de largo. Gluma superior de 3,0-4,2 mm de largo. Lemmas 7-nervias, los nervios prominentes, escabrosos, el ápice hialino, dentado, el dorso redondeado. Cariopsis de 2,5 mm de largo.

Especie sudamericana que crece en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Uruguay. Se le considera una planta valiosa como forraje para el ganado. En Chile se le encuentra desde la provincia de Santiago hasta la provincia de General Carrera (33°14'- 47°33' S), desde el nivel del mar hasta los 700 m de altitud.

Holcus lanatus L., pasto miel.

Hierbas anuales de 30-100 cm de alto, pubescentes, aterciopeladas, erectas o decumbentes. Lígula de 0,4-1,5 (-2) mm de largo. Láminas planas de 5-20 cm de largo, blanquecinas, pubescentes. Panícula de 8-20 cm, densa, contraída, blanquecina o con tintes purpúreos. Espiguillas 2-floras, de 4-5 mm de largo. Raquilla desarticula debajo de las glumas. Glumas de 4,0-4,5 mm de largo, pilosas. Gluma inferior 1-nervia; gluma superior 3-nervia, más ancha que la inferior, los nervios hirsutos. Lemmas de 2,0-2,5 mm de largo, lisas, brillantes. Lemma del antecio inferior mútica. Lemma del antecio superior con arista subapical con forma de gancho. Cariopsis de 1,5-1,7 mm de largo.

Especie europea introducida en Chile por su valor forrajero. Se le encuentra espontánea, escapada de cultivo desde la provincia de Limarí hasta la provincia de Tierra del Fuego (30°44'- 54°03' S), entre 10 y 2.800 m s.n.m. Es común en sitios eriazos, praderas y orillas de camino, especialmente en lugares húmedos.

Hordeum marinum Huds.

Hierba anual, cespitosa, grácil, de hasta 60 cm de alto. Lígulas truncadas, finamente dentadas en el ápice. Láminas planas o involutas, glabras o pilosas. Raramente auriculadas, entonces la aurícula poco desarrollada. Inflorescencias espiciformes, espigas de 1,7-6,8 cm, verdosas o blanquecinas, raramente con tintes purpúreos; raquis frágil. Espiguilla central sésil. Glumas de 13,9-25,4 mm, ligeramente setáceas, levemente comprimidas, pubescentes a escabrosas. Lemma de 8-30 mm de largo, escabrosa, aristada. Arista de hasta 17 mm de largo. Espiguillas laterales rudimentarias, estériles, con pedicelos de hasta 1,5 mm de largo. Glumas de 8,7-24,9 mm de largo, heteromorfas. Gluma inferior levemente setácea. Gluma superior de 0,7-2,1 mm de ancho, anchamente alada. Lemmas de 4,2-5,9 mm de largo, escabrosas, aristadas; arista de hasta 9,6 mm de largo.

Especie originaria del Mediterráneo europeo. Se encuentra introducida en Canadá, U.S.A., México, Argentina y Chile. En el país se encuentra desde la provincia de Valparaíso hasta la provincia de Tierra del Fuego (32º46'- 53º45' S), entre el nivel del mar y los 2.500 m de altitud.

Lachnagrostis filiformis (G. Forst.) Trin.

Hierba anual o perenne, cespitosa. Cañas erectas o geniculadas, de 15-80 cm de alto. Láminas filiformes, glabras, planas o conduplicadas, de 8-30 cm de largo x 0,5-3,0 mm de ancho. Inflorescencia en panícula laxa, 10-30 cm, con ramas filiformes desnudas hacia la base. Espiguillas de 2,5-3,5 mm, pediceladas. Espiguillas unifloras, raquilla pilosa, glumas lineares o lanceoladas, subiguales, agudas.

Se le encuentra desde la provincia de Valparaíso hasta la provincia de Linares (27º09'- 35º41' S), por debajo de los 320 m s.n.m. También en Isla de Pascua (Rapa Nui, 27º10' S, 109º26' O).

Lolium perenne L., ballica inglesa.

Hierba perenne, con rizomas cortos, de 10-90 cm de alto. Hojas con aurículas presentes, cortas. Lígula de 1,0-2,5 mm, truncada. Láminas de 5-14 cm de largo x 2-4 mm de ancho. Espiga de 10-30 cm de largo, comprimida, recta o apenas curvada. Espiguillas de 1,0-1,5 mm de largo, 4-14-floras. Gluma superior de 3,5-12,0 mm de largo, con el dorso redondeado, menor que el conjunto de los antecios, 3-9-nervia. Lemmas de 3,5-9,0 mm de largo, redondeadas en el dorso, obtusas en el ápice. Cariopsis de 4 mm de largo, fuertemente adherida a la lemma y a la pálea.

Especie europea cultivada en Chile como forrajera. Crece naturalizada desde la provincia de Huasco hasta la provincia de Tierra del Fuego (28º34'- 53º18'S), entre 5 y 1.110 m s.n.m. También en Archipiélago Juan Fernández (Robinson Crusoe) e Isla de Pascua (Rapa Nui).

Oryza sativa L. f. ***spontanea*** Roshev, arroz rojo.

Planta anual. Culmos glabros de 60-110 cm de alto, aproximadamente. Vainas abiertas en el ápice. Aurículas presentes. Lígula membranácea, aguda, de 15-45 mm de largo. Láminas de 20-30 cm de largo. Panícula laxa o contraída, semierecta a nutante. Espiguillas brevemente pediceladas, comprimidas lateralmente, de 4-8 mm de largo. Flores hermafroditas con 6 estambres. Glumas reducidas. Antecios inferiores estériles. Lemma fértil aquillada, 5-nervia, aristada. Pseudopálea aquillada, mucronada o aristulada. Cariopsis oblonga, comprimida, de 6,9-9,9 mm de largo, cubierta por la lemma.

Crece como maleza del arroz cultivado.

Panicum dichotomiflorum Michx.

Hierba anual de 0,1-1,4 m altura. Lígulas de 2 mm, membranáceas en la base y ciliadas hacia la porción superior. Cuello glabro. Láminas de 8-45 cm, oblongo-lanceoladas a lanceoladas, planas, de base subcordada y ápice atenuado, glabras. Inflorescencias de 4-30 cm, laxas, difusas. Espiguillas de 2,4-3,0 mm, largamente ovoides. Gluma superior y lemma inferior subiguales y superando en largo al antecio superior. Gluma inferior ovada, de 0,7-1,2 mm, 1/4 a 1/3 del largo de la espiguilla, glabra, de ápice truncado a agudo; gluma superior de 2,3-3,3 mm, glabra, acuminada. Lemma inferior de 2,2-3,3 mm, glumiforme. Pálea inferior de 2,1-2,5 mm, elíptica, hialina, o ausente. Antecio superior de 2,0-2,5mm, elipsoide, pajizo, castaño oscuro a la madurez, glabro. Lemma superior 7-nervia. Cariopsis elipsoidea, de 1,5-1,6 mm, castaña; hilo oblongo, embrión de 1/2 del largo del cariopsis.

Especie nativa americana, distribuida desde Canadá y U.S.A. hasta Chile y Argentina. Crece en lugares húmedos, en bordes de ríos y arroyos, frecuente en suelos modificados o como maleza en cultivos. Se encuentra desde la Región Metropolitana hasta la Región de Ñuble.

Paspalum dasypleurum Kunze ex E. Desv., maicillo, chépica, pasto miel.

Hierba perenne, cespitosa y con rizomas. Culmos de 15-70 cm de largo, erectos a geniculados, simples. Lígulas membranáceas, de 2-5 mm. Láminas de 4-25 cm, planas, glabras a esparcidamente pilosas, con pelos junto a la región ligular. Inflorescencias terminales, de 5-18 cm, solitarias. Pulvínulos con un mechón de pelos blanquecinos, de hasta 5 mm. Racimos alternos, ascendentes. Raquis de los racimos aplanado, verde a púrpureo, glabro. Espiguillas en pares, imbricadas, distribuidas en 4 series. Espiguillas ovoides, de 2,0-2,8 mm, ligeramente plano-convexas. Gluma inferior ausente. Gluma superior y lemma inferior subiguales, hialinas, tan largas como la espiguilla. Gluma superior con los márgenes pestañosos, con pelos sedosos, blanquecinos, de 1-2 mm, el resto de la superficie glabrescente a cortamente pubescente. Lemma inferior glumiforme, glabra o con unos pocos pelitos aislados. Pálea y flor inferior ausentes. Antecio superior anchamente elipsoide,

de 2,0-2,6 mm, crustáceo, pajizo, finamente papiloso. Lemma 5-nervia, con los márgenes enrollados. Lodículas 2, de 0,4 mm. Estambres 3, anteras de 1,2 mm.

Especie nativa de Argentina y Chile. Se encuentra desde la región de Coquimbo hasta la de Los Lagos. También está presente en el Archipiélago Juan Fernández. Crece desde el nivel del mar hasta 1.200 m s.n.m., en lugares húmedos, en orillas de arroyos y acequias.

Paspalum dilatatum Poir., chépica gigante, camalote.

Hierba perenne con rizomas, de 50-150 cm de alto. Lígulas de 3-5 mm, membranáceas. Láminas de 9-40 cm, planas. Inflorescencias formadas por 2 a 5 racimos, alternos. Espiguillas dispuestas en pares, imbricadas, distribuidas en 4 series. Espiguillas de 2,8-4,0 x mm, ovoides a anchamente elipsoides. Gluma superior y lemma inferior subiguales, hialinas, tan largas como la espiguilla. Gluma inferior ausente. Gluma superior de 2,8-4,0 mm, pilosa en los márgenes, con pelos sedosos, blanquecinos, el resto de la superficie esparcidamente pilosa, 7-nervia. Lemma inferior glumiforme, glabra a cortamente pilosa, 3-5-nervia. Pálea y flor inferior ausentes. Antecio superior de 2,2-2,8 mm, anchamente elipsoide, crustáceo, pajizo, papiloso, 0,6-1,2 mm más corto que la espiguilla. Lemma 7-nervia, con los márgenes enrollados. Cariopsis de 1,6-2,0 mm, obovoidea a suborbicular.

Se encuentra desde la provincia de Elqui hasta la provincia de Valdivia (29º59'- 39º59' S). También en Isla de Pascua (27°10' S, 109°26' O), por debajo de los 1.000 m de altitud. Crece en campos, bordes de caminos, vías férreas, en particular en áreas de suelo fértil.

Paspalum distichum L., chépica.

Planta perenne con cañas estoloniformes, rastrera. Culmos floríferos de 10-30 cm. Lígulas de 0,8-2 mm, membranáceas, delicadas. Láminas linear-lanceoladas, de 2-9 cm, planas, dispuestas ligeramente en forma dística. Inflorescencias terminales de 2-6 cm. Racimos 2, conjugados, raro un tercero aproximado, terminando en una espiguilla desarrollada. Espiguillas solitarias, imbricadas, dispuestas en 2 series. Espiguillas elipsoides, de 2,6-3,6 mm, de ápice acuminado, plano-convexas, pubescentes. Gluma superior y lemma inferior subiguales, coriáceas. Gluma inferior ausente, en ocasiones presente, triangular a lanceolada, 3/4 a tan larga como la espiguilla. Gluma superior tan larga como la espiguilla, esparcida a densamente pubescente, con pelitos adpresos. Lemma inferior glumiforme, tan larga como la espiguilla, glabra a esparcidamente pilosa. Pálea y flor inferior ausentes. Antecio superior elipsoide, de 2,2-2,8 mm, crustáceo, finamente papiloso, pajizo, 0,4 mm más corto que la gluma superior y lemma inferior, con un mechón de pelos en el ápice y micropelos bicelulares en el ápice de la lemma y pálea. Lemma 3-5-nervia, con los márgenes involutos. Lodículas 2, de 0,2 mm. Estambres 3, anteras de 1,2 mm. Cariopsis elipsoidea, de 1,5 mm.

Especie americana, se distribuye desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Ríos, frecuente en bañados y campos bajos, arrozales y tierras labradas.

Paspalum urvillei Steud.

Hierba perenne con rizomas, de 60-150 (-180) cm de alto. Lígulas de 2,4-4,5 mm, membranáceas. Pseudolígula formada por un arco de pelos densos, rígidos, papilosos, de hasta 7 mm. Cuello glabro. Láminas lineares, de 10-45 cm, planas. Inflorescencias terminales de 15-30 cm. Racimos usualmente más de 10, alternos. Espiguillas en pares, imbricadas, dispuestas en 4 series. Espiguillas de 1,8-2,8 mm, anchamente elipsoides. Gluma superior y lemma inferior hialinas. Gluma inferior ausente. Gluma superior tan larga como la espiguilla. Lemma inferior glumiforme, tan larga como la espiguilla o ligeramente menor. Pálea y flor inferior ausentes. Antecio superior de 1,6-2,2 mm, 0,4-1,0 mm más corto que la gluma superior y lemma inferior. Lemma con los márgenes enrollados sobre la pálea. Cariopsis de 1,3 mm, anchamente elipsoide.

Nativa de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay. Crece en campos bajos, esteros y en bordes de caminos y vías férreas. En Chile se encuentra entre la provincia de Limarí y la provincia de Diguillín (30°37′- 36°24′ S), entre 25 y 1.500 m s.n.m. Es común como maleza de diversos cultivos.

Phalaris aquatica L., mata dulce, triguera caballuna.

Hierba perenne, rizomatosa, con culmos engrosados en la base, de hasta 1,5-2,0 m de alto. Vainas de 9,5-11,5 cm de largo, abiertas en el ápice. Lígulas de 4-5 mm de largo, glabras. Láminas de 10-25 cm de largo, escabrosas. Panículas de 3,5-15,0 cm, densas, espiciformes, cilíndricas, a menudo lobadas en la base. Espiguillas homógamas, de 5,0-5,5 mm de largo, 2-3-floras, con una flor fértil y una o dos flores basales, estériles, reducidas. Glumas subiguales, de 4,8-5,5 mm, glabras, ampliamente aladas. Ala entera, teñida de verde. Lemma fértil de 3-4 mm de largo, pilosa hacia el ápice. Pálea de 2,7-3,5 mm de largo, pilosa en la quilla. Lodículas de 0,5 mm de largo. Anteras de 3,0-3,5 mm de largo. Antecios estériles 1 (o 2). Lemma estéril de 1,0-1,5 mm de largo.

De acuerdo con Baldini (1995) es propia de los Archipiélagos Macaronésicos y de la Región Mediterránea y ha sido introducida en África, América y Oceanía (Australia). En Chile crece desde la Región de Arica y Parinacota hasta la de Magallanes, en áreas disturbadas, orillas de caminos y canales con inundaciones estacionales, desde el nivel del mar hasta los 740 m de altitud.

Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud., carrizo.

Hierba perenne de 1-4 m de alto o más, erecta, rizomatosas, a menudo con estolones. Generalmente palustres, formando grandes colonias. Lígula corta, formada por una densa franja de pelos, membranácea en la base. Láminas planas o convolutas, linear-lanceoladas a lanceoladas, anchas, de 20-60 cm, glabras, con pelos de 5-7 mm en la zona ligular. Panícula de 10-40 (-45) cm de largo, amplia, usualmente laxa, densa. Espiguillas 3-5 (-11)-floras, de 9-15 mm de largo. Antecio inferior estaminado o neutro, los siguientes perfectos y progresivamente menores, el terminal estéril y reducido. Antecio inferior persistente, con callo corto y glabro, los restantes con callo alargado y piloso. Glumas oval-lanceoladas, desiguales, la inferior menor que la superior, ambas menores que los antecios. Gluma inferior 3-6 mm de largo, aguda. Gluma superior de 5-8 mm de largo, aguda. Lemmas glabras, lanceoladas, la del antecio inferior estaminado, de 8-11 mm de largo, las de los antecios superiores perfectos menores. Páleas mucho menores que las lemmas. Anteras de 1,5-2,0 mm de largo. Cariopsis de 1,0-1,5 mm de largo.

Introducida y cosmopolita, es propia de zonas templadas y cálidas. En Chile se encuentra desde la Región de Tarapacá hasta la de Los Ríos, en zonas húmedas y orillas de cursos de agua, donde suele formar grandes colonias denominadas carrizales.

Polypogon chilensis (Kunth) Pilg.

Hierba anual de 40-86 cm de alto. Lígula de 2,5-5,0 mm de largo, membranácea. Láminas de 11-17 (-25) cm de largo x 3-5 mm de ancho, planas. Panícula de (6-) 9-16 x 1-3 cm, espiciforme, contraída o laxa. Espiguillas se desprenden con un fragmento de pedicelo de 0,5-2,0 mm de largo. Pedicelos de 0,5-2,3 mm de largo, fuertemente escabrosos. Glumas de 2,0-2,6 mm, subiguales, a veces la gluma inferior levemente más larga que la superior, la quilla provista de escabrosidades de 0,2-0,5 mm de largo, el ápice agudo, mucronado. Lemmas de 1,2-1,7 mm de largo, glabras, hialinas, ápice truncado, 4-aristulado, las 2 arístulas externas más largas que las internas. Arista de 0,5-1,2 mm de largo o ausente, si presente es recta o levemente geniculada, subapical, inserta a 0,3 mm del ápice, exerta o no entre las glumas. Cariopsis de 0,9-1,5 mm.

Especie americana. En Chile se extiende desde la provincia de Huasco hasta la provincia de Chiloé (28°34'- 43°03' S). Se encuentra también en el Archipiélago Juan Fernández (Isla Robinson Crusoe). Crece desde el nivel de mar hasta los 700 m de altitud, en suelos arenosos y húmedos.

Polypogon monspeliensis (L.) Desf., cola de zorro, bearded meadow grass.

Planta anual, erecta o decumbente. Culmos de 11-75 cm de alto. Vainas de 4-11 cm de largo, más cortas tan largas como los entrenudos. Lígulas de 1-5 mm, de largo. Láminas de (3-) 8-14 cm de largo, planas, escabrosas en ambas caras y márgenes, ápice agudo. Panículas de 2-8 cm de largo, espiciformes. Espiguillas 1-floras, se desprenden con un fragmento del pedicelo de 0,1-0,2 mm de largo. Glumas aristadas, de 1,4-2,2 mm de largo (excluidas las aristas), escabrosas en el dorso, con el ápice bilobulado. Aristas de las glumas de 2-5 mm de largo, más largas que las glumas. Lemmas de 0,8-1,3 mm de largo, glabras, hialinas, brillantes, ápice truncado, 4-dentado. Arista recta, de 0,8-2 mm de largo, inserta en el ápice o en el tercio superior de la lemma, exerta o no, escabrosa. Callo glabro. Pálea de 0,7-1,1 mm de largo. Anteras de 0,3-0,45 mm de largo. Cariopsis de 0,4-1,0 mm, ovalada o elíptica, muy adherida a las glumelas.

Especie de origen eurasiático introducida en América, donde se extiende desde Canadá hasta Chile y Argentina. En Chile se encuentra desde la provincia de Arica hasta la provincia de Chiloé (18°29'- 42°46' S), desde los 30 m de altitud en las zonas costeras hasta los 3.000 m de altitud en las zonas montañosas. Crece en vegas, orillas de camino y calles. Florece entre noviembre y febrero.

Setaria parviflora (Poir.) Kerguélen, cola de zorro.

Hierba perenne con rizomas cortos, de (5-) 15-55 cm de alto, erecta o postrada. Lígulas membranáceo-ciliadas de 0,5-1,0 mm. Láminas de 5-22 cm, planas o convolutas. Inflorescencia una panícula espiciforme, densa, compacta, de 2-8 cm, incluyendo las setas. Espiguillas de 2,0-2,8 mm, ovoides, acompañadas por 3-9 setas involucrales antrorso-escabrosas de 2-7 mm. Gluma inferior 1/3-3/4 del largo de la espiguilla. Gluma superior desde 1/2 hasta igual largo que el antecio superior, ambas glumas con el ápice obtuso o brevemente apiculado. Antecio inferior generalmente neutro, a veces estaminado. Antecio superior ovoide, de 2,0-2,8 mm. Lemma rugosa, por lo general rojiza y brevemente apiculada en el ápice, pálea de 0,8 mm de ancho. Cariopsis de (1-) 1,3-2,0 mm, elipsoidea.

En Chile se encuentra desde la provincia de Huasco hasta la provincia de Malleco (28°30'- 37°48' S). Ruderal, invasora de cultivos y campos naturales, crece desde casi el nivel del mar hasta los 1.900 m s.n.m. También está presente en Isla de Pascua y en el Archipiélago Juan Fernández (Robinson Crusoe).

Setaria pumila (Poir.) Roem. & Schult., cola de zorro.

Hierba anual, cespitosa, de 30-100 cm de alto. Lígulas de 0,8-1,5 mm, membranáceo-ciliadas. Láminas de 8-22 cm, linear-lanceoladas, planas. Inflorescencia una panícula espiciforme, cilíndrica, densa, de 3-16 cm. Espiguillas de 2,9-3,2 mm, ovoides, acompañadas por 8-9 setas involucrales antrorso-escabrosas de 3-6 mm. Gluma inferior 1/4-1/2 del largo de la espiguilla. Gluma superior alcanzando 1/2-3/4 del largo del antecio superior, ambas glumas con el ápice apiculado u obtuso. Antecio inferior generalmente asexuado, a veces estaminado, estambres 3, bien desarrollados. Lemma inferior de igual largo que la lemma superior, apiculada. Pálea inferior bien desarrollada, igualando el largo de la pálea superior. Antecio superior de 2,9-3,2 mm, ovoide. Lemma notablemente rugosa en toda su extensión, de ápice apiculado u obtuso.

Crece desde la provincia de Arica hasta la provincia de Cautín (18°30'- 38°29' S), entre los 90 y 840 m s.n.m.

Taeniatherum caput-medusae (L.) Nevski (=*Elymus caput-medusae* L.), cabeza de medusa.

Hierba anual de hasta 65 cm de alto. Hojas con aurículas comúnmente presentes, de 0,1-0,4 mm de largo. Lígulas de 0,2-0,5 mm, membranáceas, truncadas. Láminas de 5-13 cm, planas a involutas. Inflorescencias en espigas, erectas, exertas, de 2,1-6,0 cm de largo (sin considerar las aristas). Espiguillas comprimidas dorsiventralmente, de 8-39 mm de largo, 2-3-floras, el antecio más basal de cada espiguilla perfecto, el distal o los distales reducidos, estériles. Glumas iguales a subiguales, subuladas, de 12-25 mm de largo, de bases connadas. Lemma de 5,7-7,8 mm.

mm de largo, 3-5-nervia, glabra o escabrosa. Arista de 20-105 mm de largo, divergente. Cariopsis de 4,1-5,0 mm de largo, elíptica, ligeramente adherida a la lemma y/o a la pálea.

Especie de origen europeo, asiático y africano, introducida y naturalizada en Chile, donde se encuentra desde la provincia de Cardenal Caro hasta la provincia Cauquenes (34°07'- 36°05' S), a orillas de caminos y bordes de cultivos de arroz, entre los 100 y los 300 m de altitud.

Familia Polygonaceae

Polygonum acuminatum Kunth

Hierba perenne con tallos decumbentes de 0,5-2,0 m de largo. Hojas linear-lanceoladas, de 10-20 x 1-3 cm, las superiores con margen y nervio medio pestañosos, pecíolo de 2-5 mm de largo. Ócrea cilíndrica, de 3-4 mm de largo, que cubre la mitad o más de la mitad de los entrenudos, ápice largamente ciliado. Flores dispuestas en racimos espiciformes.

Especie americana. Crece entre las Regiones del Libertador Bernardo O'Higgins y Ñuble, en cultivos de arroz.

Polygonum hydropiper L., duraznillo.

Hierba anual, con talos de 20-80 cm de largo. Hojas lanceoladas, de 5-12 x 1-2 cm, sésiles, glandulosas. Ócreas no acuminada, de 8-12 mm de largo, ápice con setas largas, cubren sólo una pequeña parte del entrenudo. Flores en racimos como espigas, delgados, laxos, nutantes.

Especie europea, propia de sitios húmedos. Ha sido citada como maleza del arroz.

Polygonum hydropiperoides Michx., duraznillo.

Hierba perenne con tallos de 60-100 cm de largo. Hojas lineares a ovado-lanceoladas, de 4-10 x 0,5-2,0 cm, márgenes estrigosos. Ócreas cilíndricas, de 10-16 mm de largo, cubiertas de cerdas ralas y cortas en la cara externa, con setas largas en el ápice. Flores dispuestas en racimos espiciformes, nutantes, laxos.

Especie americana, común en lugares húmedos y cultivo de arroz.

Polygonum lapathifolium L., duraznillo.

Hierba perenne con tallos de hasta 80 cm de alto, cubiertos por manchas rojizas. Hojas ovadas a linear-lanceoladas, de 5-12 cm de largo, ápice agudo a obtuso, a menudo con una mancha central de color negro. Ócrea tubular de 0,5-1,0 cm de largo, ciliada. Flores en racimos espiciforme densos, de 1-5 cm de largo, erguidos, ócrea que acompaña a las flores acuminada.

Especie europea. Maleza de numerosos cultivos agrícolas, incluyendo arroz. También en sitios ruderales.

Polygonum persicaria L., duraznillo.

Hierba anual con tallos de 50-90 cm de alto. Hojas lanceoladas a linear-lanceoladas, de 1,5-7,0 x 0,5-2,5 cm, margen con rígidos. Ócrea tubular, ápice con pelos cortos, cubren solo una pequeña parte del entrenudo. Flores en racimos cortos y densos, de 1,5-3,0 cm de largo, erguidos o nutantes.

Especie originaria de Europa, muy similar a la anterior y crece en los mismos hábitats.

Familia Potamogetonaceae

Potamogeton pusillus L., huiro, canehuín, espiga de agua.

Hierba perenne, acuática, sumergida, arraigada al sustrato, con tallos de hasta 180 cm de largo, filiformes, de 0,1-0,7 mm de ancho. Hojas de 9-65 x 0,2-2,5 mm, lineares, angostas, con 1-3 venas. Flores en inflorescencias de 1,5-10,0 mm de largo, compuestas por 3 a 6 flores dispuestas en verticilos.

Especie cosmopolita. En Chile crece desde la Región de Antofagasta a la de Los Ríos. Es común en cuerpos de aguas lénticos y canales de regadíos. Se propaga mediante brotes (turiones) que la planta produce en grandes cantidades.

Zannichelia palustris L., cachaguita.

Hierba perenne, acuática, sumergida, arraigada al sustrato, con tallos de hasta 100 cm de largo, filiformes. Hojas lineares, opuestas, muy finas, de 1-20 cm de largo, con 1 nervio. Flores en racimos axilares, formados por una flor femenina y otra masculina.

Especie cosmopolita. Se le encuentra desde la Región de Antofagasta a la del Maule, y en Magallanes, en canales de regadío, con aguas limpias y corrientes, y también en aguas salinas, o contaminadas.

Familia Ranunculaceae

Ranunculus apiifolius Pers.

Hierba anual con tallos de 30-60 cm de largo, ramificados. Hojas variables, láminas 3-7 partidas, segmentos lobulados, hacia el ápice lineares, enteros. Flores agrupadas de manera laxa, sépalos 5, de 3-5 mm de largo, pétalos más pequeños, de color amarillo.

Especie nativa de América del Sur (Uruguay, Paraguay, sur de Brasil y centro de Argentina). Citada por Matthei et al. (1995) como maleza sólo en el cultivo de arroz.

Familia Rubiaceae

Sherardia arvensis L., azulillo.

Hierba anual con tallos de hasta 40 cm de largo. Hojas sésiles, dispuestas de 4-6 en verticilos, obovadas, agudas a mucronadas. Flores en cabezuelas terminales con 4-10 flores protegidas por las hojas que forman un involucro.

Especie europea, introducida en Chile donde crece asilvestrada en una gran cantidad de ambientes, tanto agrícolas como ruderales. Ocasionalmente aparece en los pretiles del cultivo de arroz.

Familia Salviniaceae

Azolla filiculoides Lam., flor del pato, tembladerilla, luchecillo, hierba del pato.

Hierba anual, acuática, flotante y pequeña que forma poblaciones que cubren completamente la superficie del agua. Hojas muy juntas y comprimidas, de color violáceo oscuro, de 1 mm de largo, oblongas a ovadas, con dos lóbulos.

Especie americana, nativa. Importante por su capacidad de fijar nitrógeno por asociación con la cianobacteria *Anabaena azollae*. Se encuentra en cultivos de arroz. En Chile crece desde el extremo norte del país hasta la Región de Los Lagos.

Salvinia auriculata Aubl.

Hojas flotantes, dobladas a lo largo del nervio medio. Cara inferior con papilas densas, con 4 segmentos curvos separados, cara superior con pelos multicelulares. Hojas sumergidas de hasta 12 cm de largo, lóbulos con pelos densos de color marrón de hasta 2 mm de largo.

Originaria de América tropical. Forma alfombras densas que obstruyen el flujo de agua e impiden el paso de luz. Se le ha encontrado en la Región de Valparaíso, en lagos, lagunas, ríos, pantanos y cultivos de arroz.

Familia Typhaceae

Typha angustifolia L.

Hierba perenne, palustre, con tallos arraigados al sustrato. Hojas lineares, planas, 0,3 a 0,7 cm de ancho. Inflorescencia densa, espiciforme, compacta, de color castaño, flores masculinas en la parte superior, y las femeninas en la parte inferior, separadas por una porción del tallo. Raquis secundarios de base algo escalariforme, pero subcilíndricos en la mitad superior.

Se le ha encontrado en las Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Valparaíso, Maule, La Araucanía y Los Ríos, creciendo en aguas poco profundas de lagos, ríos, estanques, pantanos y acequias.

Typha domingensis Pers., vatro, paja de estera, cortadera macho, totora.

Hierba perenne, palustre, con tallos arraigados al sustrato. Hojas lineares, planas, de 0,5 a 1,6 cm de ancho. Inflorescencia densa, espiciforme, compacta, de color castaño, flores masculinas en la parte superior, y las femeninas en la parte inferior separadas por una porción del tallo. Raquis secundarios subpiramidales, escalariformes, a veces truncados.

Especie nativa americana, actualmente distribuida en casi todo el mundo en ambientes pantanosos. Ocasionalmente también en el cultivo de arroz.

Familia Verbenaceae

Verbena bonariensis L., verbena.

Hierba anual o bienal con tallos de hasta 1,5 m de alto, cuadrangulares, con pelos tiesos. Hojas lanceoladas, sésiles, de 3-7 cm de largo, margen aserrado, ápice agudo, hirsutas. Flores de color morado, dispuestas en espigas densas cilíndricas.

Especie nativa de América del Sur. Es común a orillas de caminos, praderas y sitios eriazos. Ha sido citada como presente en los pretiles del cultivo de arroz.

Glosario

Acuminado: ápice de un órgano (ej. hoja, glumas, lemmas) que termina gradualmente en una punta aguda.

Agudo: se refiere al ápice de la hoja que forma un ángulo agudo.

Alterno: que se disponen unas después de las otras.

Antecio: en la espiguilla de gramíneas, cada una de las unidades que llevan las flores y, cuando maduros, a los frutos. Se componen de dos brácteas denominadas lemma y pálea que encierran una flor.

Antrorso: se refiere a la disposición de los órganos, apéndices, etc. (ej. pubescencia) que se dirige hacia adelante o hacia el ápice del órgano (en oposición a retrorso).

Anual: se refiere a la planta que nace, se desarrolla, florece y fructifica durante un solo periodo en un año.

Aquenio: fruto indehiscente, seco, con una semilla, con el pericarpio no soldado a la semilla.

Arista: extremidad sutil, pero tiesa, presente en las glumas y glumelas de las gramíneas.

Aserrado: con el margen con dientes agudos y juntos.

Atenuado: adelgazado, estrechado.

Aurícula: apéndice foliáceo, pequeño, ubicado en el pecíolo o en la base de la lámina.

Auriculada: que lleva aurículas.

Bienal: se refiere a la planta que vive más de un año, sin pasar de dos. El primer año germina y se desarrolla, y el segundo florece y fructifica.

Bilabiada: hace referencia a la flor cuando se divide formando como una boca abierta.

Bráctea: cualquier órgano foliáceo que se ubica cerca de las flores, diferente a las hojas.

Cáliz: estructura formada por los sépalos que son las partes más externas de la flor, generalmente verdes.

Capitada: inflorescencia con forma de cabezuela.

Capítulo: inflorescencia donde las flores van dispuestas sobre un disco cónico, plano, o cóncavo, algo dilatado.

Cápsula: fruto seco, dehiscente.

Cariopsis: fruto con una semilla, seco, indehiscente, con el pericarpio unido a la semilla.

Ciliolado: cubierto de cilíolos, cilios muy pequeños, pelo muy fino.

Cima: inflorescencia que remata en una flor, al igual que los ejes secundarios.

Conduplicada: en las hojas, cuando se doblan a lo largo del nervio medio.

Connadas: se refiere a los órganos que, al desarrollarse juntos, parecen más o menos unidos entre sí.

Cordada: con forma de corazón.

Corola: formada por los pétalos, generalmente coloreada.

Cuadrangular: tallos de algunas especies como *Verbena bonariensis* que, en sección transversal, tienen forma cuadrada.

Culmos: tallo articulado de las gramíneas. Se divide en nudos y entrenudos. Estos últimos pueden ser huecos o sólidos.

Decusada: hojas, brácteas o ramas que van opuestas y colocadas en cruz con los nudos siguientes, tanto el de arriba como el de abajo.

Dentado: con prominencias como dientes, no agudos.

Digitado: que tiene lóbulos semejantes a dedos. Órgano que tiene sus partes alargadas y divergentes, partiendo desde un punto.

Elíptico: con forma de elipse.

Equinulada: cubierta por espinas o púas delgadas o pequeñas.

Escabriúscula: apenas cubierto de asperezas.

Escalariforme: en forma de peldaños, como una escalera.

Espiga: inflorescencia racemosa, simple, con las flores sésiles dispuestas a lo largo del eje floral.

Espiguilla: unidad fundamental de la inflorescencia de las gramíneas. Se compone de dos brácteas estériles (glumas) y una o más brácteas fértiles o glumelas (lemma y pálea) que encierran a las flores y posteriormente a los frutos.

Estaminado: que tiene estambres.

Estolón: brote lateral, más o menos delgado, a menudo largo, que nace de la base de los tallos y crece de manera horizontal sobre o bajo el suelo.

Estriado: que lleva estrías.

Exerto: se refiere a los estambres que se asoman por sobre los sépalos o pétalos.

Filiforme: de forma delgada, muy fina.

Flores liguladas: flor zigomorfa de las asteráceas, con un lado alargado, la lígula, terminada en 3 a 5 dientes.

-forme: Sufijo, de forma de.

Geniculado: con un nudo en el tallo o caña.

Glomérulo: inflorescencia formada por una cima muy contraída de forma más o menos globosa.

Glumas: en la espiguilla de gramíneas, las dos primeras brácteas que la conforman. Las glumas son brácteas estériles, esto es, no llevan flores o frutos.

Hermafroditas: plantas y flores que tienen ambos sexos.

Hialina: transparente, diáfano.

Híspida: cubierto de pelos muy tiesos y sumamente áspero al tacto.

Hoja compuesta: formada por más de una lámina, cada una de las cuales es un folíolo.

Hoja simple: formada por una lámina solamente.

Homógama: inflorescencia compuesta por flores con igual sexualidad; por ejemplo, con todas las flores fértiles (en oposición a inflorescencias compuestas por flores fértiles y estériles).

Inflorescencia: es un sistema de ramificación que termina con una flor o varias flores.

Involucro: todo el conjunto de brácteas dispuestas cerca de las flores o que las envuelven en mayor o menor grado.

Lámina: parte de la hoja. Es la parte más o menos ensanchada que se une al tallo por el pecíolo (o en las gramíneas por la vaina).

Lanceolada: con forma de lanza, angostamente elíptica, con los extremos agudos.

Lemma: en la espiguilla de las gramíneas, cada una de las brácteas fértiles que encierran a las flores o frutos. Ver también antecio.

Linear: con forma alargada y angosta, con los bordes casi paralelos.

Liso: con bordes sin prominencias, ni resaltos.

Lobulada: dividida en lóbulos.

Lóbulo: cada parte poco profunda en que se divide un órgano, de forma redondeada.

Lodícula: en la flor de las gramíneas, las lodículas son dos o tres pequeñísimas brácteas situadas en la base del ovario. Permiten la separación de la lemma y la pálea durante la antesis.

Mútico: órgano sin punta o sin arista terminal.

Nudo: zona del tallo donde nacen las hojas.

Nutante: péndulo, colgante, generalmente en referencia a las flores.

Oblonga: órgano alargado, más largo que ancho, con los lados algo paralelos.

Obovada: de forma ovada, pero con la parte ancha hacia el ápice.

Obtuso: en el ápice sus bordes forman un ángulo obtuso. También se dice de un órgano no terminado en punta.

Ócrea: estípulas membranosas concrescentes que se unen en una pieza rodeando al tallo, y acompañando a la hoja. Son típicas de la familia Polygonaceae.

Opuesto: cuando los órganos se encuentras situados uno frente al otro. Las hojas van en número de a dos en cada nudo.

Ovado: con forma de huevo.

Panícula: inflorescencia de tipo racemoso en que los ramitos van decreciendo de la base al ápice, es un racimo de racimos. Consiste de un eje más o menos alargado, que lleva ramificaciones simples o ramificadas. Pueden ser laxas o contraídas, en este último caso, pueden tener ramificaciones tan cortas que semejan una espiga (panoja espiciforme). También se denomina panoja.

Panoja: sinónimo de panícula.

Pappus: papo o vilano es el cáliz transformado en pelos simples o plumosos o cerdas, en un fruto proveniente de un ovario ínfero. Común en Valerianaceas, Asteráceas y Dipsacáceas.

Partida: lámina dividida hasta casi la mitad sin alcanzar el nervio medio.

Pedicelado: con un pedicelo, es decir con cabo o rabillo.

Perenne: planta que vive tres o más años.

Perigonio: envoltura floral formada por piezas de idéntica morfología, no pudiendo distinguirse el cáliz y la corola, por lo cual las piezas se denominan tépalos (en oposición a sépalos y pétalos).

Piramidal: que tiene forma de pirámide.

Pseudo-: para indicar algo falso.

Pubescente: cubierto por pelo fino y suave.

Pulvínulo: base foliar engrosada en forma de cojín.

Punzante: que pincha.

Quilla: en las flores de leguminosas, se refiere a los dos pétalos más internos de la flor, unidos formando una estructura con forma de bote. En las gramíneas, las brácteas pueden tener forma de bote, con la parte inferior parecida a la quilla de un bote.

Racimo: inflorescencia compuesta de un eje del cual brotan flores pediceladas más o menos distantes.

Raquilla: en la espiguilla de las gramíneas, la raquilla es el eje que sostiene a los antecios.

Raquis: eje principal de una inflorescencia compuesta de gramínea.

Rastrera: se refiere al tallo que crece apoyado en el suelo.

Reflexo: dícese de las hojas, brácteas, pedicelos, pelos, etc., que se dirigen hacia la base del tallo, de la rama. Encorvado, hacia atrás.

Reniforme: con forma de riñón.

Rizoma: tallo subterráneo que posee yemas y brotes.

Sagitada: con forma de saeta, flecha.

Seta: pelo algo tieso no muy corto.

Setácea: fino como una seta.

Sub-: prefijo que significa casi y se emplea para atenuar el significado de la otra parte de la palabra.

Trígono: tallos con tres caras, como en las Cyperaceae.

Triquetro: tallos de sección triangular, con tres cantos.

Truncado: que termina o remata en un borde o un plano transversal como si estuviera cortado.

Umbela: inflorescencia racemosa donde las flores parten de un mismo punto y los pedicelos tienen la misma longitud.

Venación paralela: hojas con las venas o nervios principales dispuestos en forma paralela.

Venación reticulada: hojas con una sola vena o nervio principal. Las venas o nervios secundarios y de menor orden están interconectados formando un retículo o red.

Verticilo: conjunto de hojas que nacen a un mismo nivel del tallo.

Referencias

Alvarado, R., Hernaíz, S. 1995. Control de malezas. p. 45-52. En 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.

Cerejeira, M.J., Viana, P., Batista, S., et al. 2003. Pesticides in Portuguese surface and ground waters. Water Res. 37:1055-1063.

Dass, A., Shekhawat, K., Choudhary, A.K., et al. 2017. Weed management in rice using crop competitiona review. Crop Prot. 95:45-52.

Fuentes, N., Sánchez, P., Pauchard, A., et al. 2014. Plantas invasoras del Centro-Sur de Chile: Una guía de campo. Laboratorio de Invasiones Biológicas (LIB), Concepción, Chile.

Finot, V.L., Figueroa, M., Pérez, A. 2000. Distribución de comunidades de malezas en la provincia de Ñuble, VIII Región, Chile. Agro-Ciencia 16(1):33-46.

Henríquez, R., Henríquez, G., Sepúlveda, D., et al. 2018. Siembra. p. 52-58. En Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas de arroz en Chile. Serie Estudios para la Innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.

Holm, L., Plucknett, D., Pancho, J., et al. 1977. The world´s worst weed: distribution and biology.

Matthei, O., Marticorena, C., Rodríguez, R. 1995. Manual de las malezas que crecen en Chile. Alfabeta Impresores, Santiago, Chile.

Ormeño, J. 1983. Prospección de las principales malezas asociadas al cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) Agric. Téc. (Chile) 43:285-287.

Pedreros, A., Kramm, V. 2007. Manejo de las malezas en el cultivo de arroz. p. 105-162. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, Manejo Tecnológico. Boletín INIA N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Ramírez, A. 1980. Malezas de Chile. Boletín Técnico N°1. 47 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

Ramírez, C., Finot, V., San Martín, C., et al. 1991. El valor indicador ecológico de las malezas del centro-sur de Chile. Agro-Sur 19:94-116.

San Martín, J., Ramírez, C. 1983. Flora de malezas en arrozales de Chile central. Cienc. Inv. Agr. 10(3):207-222.

Sims, G., Alvarado, R. 1972. Control de malezas. p. 69-78. En Manual de producción de arroz. Boletín Técnico N°54. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Urrutia, J., Sánchez, P., Pauchard, A., et al. 2017. Flora acuática y palustre introducida en Chile. 92 p. Laboratorio de Invasiones Biológicas, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Vallejos, C. 2018. Identificación y comparación de malezas presentes en paños para cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo siembra inundada y directa, en Unicavén, Parral. 68p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía, Talca, Chile.

Capítulo 21. Control de malezas del arroz en Chile

Alejandro Toro Y., Mario Paredes C., Jorge Nitsche M., Fernando Pardo del C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V.

En Chile, las malezas constituyen el principal problema agronómico en la producción del arroz (Foto 1). La presencia de malezas afecta en forma importante el rendimiento del arroz (Sims y Alvarado, 1972; Ormeño, 1983a; Alvarado et al., 1985; Ormeño, 1992; Alvarado y Hernaíz, 2001; Pedreros y Kramm, 2007) y la calidad del grano (Sims, 1959; Alvarado y Lobos, 1986). En diferentes ensayos de campo se han cuantificado pérdidas de hasta 100 % de la producción, dependiendo, principalmente, del grado infestación, especialmente en los primeros estados del cultivo.

Para lograr un buen control de malezas es importante considerar los siguientes aspectos: 1) rotación de cultivos (Sims, 1983); 2) buena preparación de suelos (Hernaíz, 1986a; Alvarado y Pedreros, 1992); 3) nivelación de los suelos (Grau y Cisternas, 1986); 4) uso de semilla mejorada (Sims, 1959) o certificada (Alvarado y Hernaíz, 2007; Pedreros y Kramm, 2007); 5) siembra en la fecha recomendada (Alvarado y Hernaíz, 2007); 6) fertilización (Bertín et al., 1984; Alvarado et al., 1985; Alvarado y Lobos, 1986; Hernaíz, 1986a; Pedreros y Kramm, 2007); 7) densidad de plantas recomendada (Alvarado y Hernaíz, 2007); 8) manejo adecuado de la altura del agua en siembras con semilla pregerminada (Pedreros y Alvarado, 1994; Hernaíz y Alvarado, 2007; Pedreros y Kramm, 2007) y; 9) uso adecuado de herbicidas (Hernaíz, 1986b; Pedreros y Kramm, 2007).

Malezas presentes en el arrozal

En siembras de arroz inundado, con semilla germinada, se presentan una serie de malezas típicas del cultivo del arroz que están adaptadas a la vida acuática, por lo que el manejo de las malezas bajo estas circunstancias es diferente al de otros cultivos de primavera regados (Sims y Alvarado, 1972). Sin embargo, en las siembras directas de arroz, las malezas que compiten con el cultivo en sus primeros estados de desarrollo, son malezas similares a las que se presentan en cultivos que se siembran en suelos no inundados, y como en aquellos cultivos, es importante tener un especial cuidado con su control (Henríquez et al., 2018).

Foto 1. Infestación de arrozal con pasto cabezón.

Evolución de la presencia de malezas y su control en el cultivo del arroz

Siembras de arroz pregerminado

En la primera década de siembras de arroz en Chile el problema de las malezas fue limitado, ya que se usaron suelos ´vírgenes`, en los cuales no se había sembrado arroz previamente. Sin embargo, a medida que se fue intensificando el uso de los suelos arroceros, las malezas típicas que crecen en ´suelos inundados` comenzaron a constituir un problema económico-cultural, lo que se vio favorecido, también, por un deficiente control de malezas y por la ausencia de rotaciones con otros cultivos (Sims, 1959; 1969; Sims y Alvarado, 1972). La primera referencia de las malezas como un factor limitante en el cultivo de arroz, alude a una siembra realizada en el Fundo ´El Arrozal`, ubicado a tres kilómetros de la localidad de Graneros, en la Región Metropolitana. Al respecto, se informa que en esa siembra se detectaron 22 tipos de malezas diferentes, de las cuales la más abundante y perjudicial era el hualcacho (*Echinochloa* spp.) (Foto 2), al ser una planta de difícil control debido a su parecido con la planta de arroz, especialmente en sus primeros estados de desarrollo (Anríquez, 1934).

Foto 2. El Hualcacho (*Echinochloa* spp.) está entre las especies más perjudiciales en arroz. Gentileza R. Henríquez.

En aquella época, algunas de las recomendaciones más importantes para mantener el cultivo de arroz libre de malezas, era realizar un control previo a la siembra a través del pastoreo de las malezas con animales, la aplicación de riegos que favorecieran la emergencia temprana de malezas, las que se eliminaban con rastrajes previo a la siembra, y el uso de semilla limpia (libre de malezas). De esta manera se lograba reducir la infestación de las malezas en el cultivo, sin aumentar significativamente el costo de producción del arroz (Silva, 1937). Posterior a la siembra, el control de las malezas se realizaba a mano, con la presencia del agua en los cuarteles o sin ella, dependiendo de la disponibilidad de trabajadores. La principal maleza presente en el arrozal era la planta leguminosa conocida como ´frijolillo`, representada por diversas especies y variedades que producían una semilla pequeña de colores negro o crema (carmelita o amarillo), muy difícil de separar del grano de arroz, y que reducía su valor comercial. Otras malezas presentes en los arrozales eran diferentes especies de Carex, juncos, gramíneas acuáticas, entre las cuales se destacaba la maleza conocida como ´barbarroja`, por el color rojo de su espiga (Silva, 1937).

A fines de la década de 1930, las principales malezas que competían con el arroz eran la chépica (*Paspalum* spp.), juncos, *Carex* y *Typhas* (totoras), entre otras. Los métodos de control de las malezas

más recomendados eran la preparación del suelo, el uso de cultivadores en las siembras que utilizaban el sistema de almácigo-trasplante, y la limpia a mano de las malezas en siembras al voleo. Asociado al problema de malezas, el cultivo de arroz presentaba a menudo la presencia de algas, las que se podían eliminar con rastras livianas y/o con la aplicación de sulfato de cobre en solución al 10 % (Opazo, 1939).

Una preocupación de aquella época, asociada a la presencia y el control de las malezas, era la calidad de la semilla utilizada por los agricultores. Al respecto, un estudio taxonómico del arroz o semilla nacional determinó la presencia de 11 tipos de plantas de arroz con características morfológicas diferentes, y 13 tipos de plantas de arroz con granos rojos, cuyo posible origen sería el cruzamiento natural de la maleza conocida como ´arroz rojo`, con el arroz comercial (Theune, 1941).

En 1940, el control de malezas continuaba siendo una de las prácticas culturales más importantes en el arrozal, ya que los diferentes grados de infestación significaban pérdidas económicas importantes, por lo cual, la recomendación era iniciar el control de las malezas temprano, para reducir la competencia de la planta y no afectar el rendimiento y la calidad del grano producido. El método de control de malezas utilizado era manual y consistía en cuadrillas de obreros que arrancaban todas las malezas presentes en el cultivo, las que depositaban posteriormente en los pretiles. Este control se repetía una o dos veces, de acuerdo a la cantidad de malezas presentes en el arrozal (Villalobos, 1941). Las principales malezas presentes en el cultivo del arroz eran el arroz rojo, hualcacho, chépica, totora, estoquilla y la hualtata, siendo las tres últimas de menor importancia, por el daño que causaban en el arrozal (Foto 3) (Villalobos, 1941).

Además del daño causado en el campo, las malezas continuaban siendo un problema posterior a la cosecha del arroz, ya que su presencia implicaba un castigo económico al arroz comprado por la industria. El análisis realizado por la industria consideraba los siguientes parámetros: rendimiento grano paddy (kg), rendimiento industrial (%), humedad (%), impurezas (%), granos rojos (%), granos verdes, (%), granos fallos (%), entre otros (Astorga, 1944). Las malezas más comunes en este período eran: *Paspalum vaginatum* (Chépica), *Oenothera* spp. (Don Diego de la noche), *Vicia* spp. (arvejillas), *Medicago* spp. (hualputras), *Anoda hastata* (malvilla) y *Echinochloa crus-galli* (hualcacho) (Astorga, 1944).

En la década de 1940, la hualtata era la maleza más importante en el cultivo de arroz (Foto 3). Sin embargo, la presencia del hualcacho fue aumentado progresivamente debido al uso de métodos de control (manual) poco adecuados, llegando en algunos casos a pérdidas importantes en el cultivo (Sims, 1969). En este aspecto, se plantea que el hualcacho fue introducido al país alrededor de 1940 (Matthei, 1963), aunque otro autor señala que esta maleza estaba presente en los cultivos de arroz en la década de 1930 (Anríquez, 1934).

Foto 3. Infestación del arrozal con hualtata (Alimastáceas). Gentileza A. Toro.

A fines de esta década, dado el aumento de la infestación de malezas en el cultivo, se empezó a crear conciencia de la necesidad de incorporar, con mayor frecuencia en las labores del cultivo, la práctica del control de malezas, aunque esta labor encareciera los costos de producción. Esta labor incluía la eliminación de las plantas en forma manual de los cuadros, especialmente de hualcacho (*Echinochloa* spp.), totora (*Eleocharis* spp.) y hualtata que eran muy perjudiciales para el cultivo (Gemién, 1946; Olate, 1950). A pesar de esta situación, en algunos casos la infestación de malezas de hualcacho era tan grande al momento de la cosecha que los agricultores se veían obligados a abandonar el cultivo (Gemién, 1946).

Estudios realizados en hualcacho indican que esta planta posee una mayor capacidad competitiva que la planta de arroz, debido a que es una planta C_4 comparada con el arroz que es una planta C_3. Por ello, esta maleza es más eficiente fotosintéticamente que el arroz, aún en condiciones de menor luminosidad y temperatura, generando una mayor tasa fotosintética por unidad de área foliar y mayor materia seca por unidad de agua utilizada, lo que se traduce en un mayor crecimiento de la planta en condiciones óptimas para la fotosíntesis. Estas características explican, en gran parte, la mayor agresividad de estas malezas, especialmente en sus primeros estados de desarrollo (Bouhache, 1993; Gibson y Fisher, 2001; Covshoff et al., 2016).

A partir de 1950 se empezaron a usar los primeros herbicidas sintéticos en el arroz (Sotomayor, 1954; Elgueta, 1955). Es así como se realizaron las primeras experiencias en el uso de herbicidas, para el control de las malezas de hoja ancha (Sims, 1969). Para lograr este objetivo, se utilizó MCPA amina en dosis de 2 L ha^{-1}, diluidos en 180 L de agua. El herbicida controló la hualtata (*Alisma* spp.) (Foto 4) y la hierba de la rana (*Ludvigia peploide*), pero no controló hualcacho (*Echinocloa* spp.). Para realizar la aplicación del herbicida, se bajó el nivel del agua y se volvió a inundar el suelo después de 2 d desde la aplicación, para reducir el efecto de la clorosis en las plantas (Elgueta, 1955). En el año 1953, el Plan Chillán, a través de su Programa de Extensión, organizó una campaña para demostrar el efecto del control de malezas de hoja ancha, mediante el uso de herbicidas, en la localidad de San Carlos. Producto de este trabajo, en la temporada siguiente (1954-1955), se aplicó herbicida (MCPA) a 350 ha de arroz con buenos resultados (Elgueta, 1955).

Foto 4. Control de hualtata con MCPA. Gentileza F. Pardo.

En aquella década, se señala que las principales malezas presentes en el cultivo de arroz eran hualcacho (*Echinochloa* spp.), hualtata (*Alisma* spp.), batro, totora (*Typha* spp.), junquillo (*Juncus* spp.), duraznillo (*Polygonum persicaria*), lengua de vaca (*Sagittaria chilensis*), hierba de la rana (*Ludwigia peploides* ssp. *montividensis*), quilinen (*Eleocharis palustris*), chépica (*Paspalum distichum*) y la lama (Koller, 2018).

En la década de 1960 aparecen los primeros graminicidas selectivos para el control de malezas en arroz, como el molinate, herbicida del grupo de tiocarbamatos, inhibidor de la síntesis de lípidos y de aplicación en pre-emergencia, aún con registro en Chile, aunque en California sus fabricantes optaron por eliminar su uso la década pasada, después de más 30 años de aplicación en el cultivo de arroz.

A partir de 1970 se empiezan a evaluar algunos herbicidas como el 2,4-D, en sus formas de amina, ácido o ésteres. Sin embargo, sus resultados no fueron los esperados, ya que esta molécula producía fitotoxicidad y su rango de dosis selectiva era muy estrecho. También se evaluó el MCPA que en su formulación amina fue más selectivo, es decir, producía buen control de malezas de hoja ancha y algunas ciperáceas, sin causar daño a la planta, teniendo en cuenta la época bien precisa de aplicación en relación al desarrollo del cultivo. En la actualidad se continúa utilizando el MPCA, especialmente para el control del pasto cabezón (*Schoenoplectus mucronatus*). Por su parte, el 2,4,5 –T (Arbustox), que se recomendaba especialmente para el control de malezas arbustivas, fue evaluado en arroz y mostró un buen control de malezas de hoja ancha y ciperáceas y una excelente selectividad. Sin embargo, por problemas de toxicidad y residualidad, se prohibió su uso a nivel mundial. Otros herbicidas evaluados en esa época fueron: oxadiazón, tiobencarb, penoxalín, fluorodifén, dimetametrina, drepamon, clomazone y pendimetalina, varios de los cuales no cumplieron los requisitos de selectividad. Pero dentro de este grupo de herbicidas, es importante destacar a pendimetalina, por sus buenos resultados de selectividad y control, aunque el producto no se llegó a comercializar, ya que en aquella época predominaba el sistema de siembra inundado. Actualmente, esta molécula es empleada como herbicida pre-emergente para el control de malezas en el sistema de siembra directa del arroz (Henríquez et al., 2018), aunque aún no se encuentra bajo registro en Chile.

Durante este período, otro de los problemas que enfrentaba el control de malezas era la escasa nivelación de los suelos, situación que producía grandes diferencias en la altura de agua en los cuadros sembrados con arroz, lo que influía en la eficacia del control químico de las malezas y también sobre las especies de malezas que afectaban al cultivo. De hecho, muchos herbicidas que eran efectivos en el control de hualcacho (*Echinochloa* spp.) y malezas de hoja ancha a nivel de ensayos experimentales, donde se tenía una buena nivelación y preparación de los suelos, no eran efectivos bajo las condiciones de los agricultores, debido al deficiente manejo de sus suelos. De esta manera, herbicidas como tiobencarb, oxadiazon y otros, fueron descartados para su comercialización por su eficiencia errática en el control de malezas, debido a las deficientes condiciones existentes en el manejo del suelo por parte de los productores.

La mayoría de los herbicidas recomendados se aplicaban a las malezas expuestas, pero muchas de estas malezas quedaban bajo el nivel del agua. Para solucionar este problema se cerraba la entrada y salida del agua por lo menos por 48 h, para permitir que al bajar el nivel del agua por evaporación las malezas pudieran exponer su follaje a los herbicidas y así favorecer su acción. Los herbicidas más recomendados eran el MCPA, propanil, molinate y bentazon. Después de un período de poco uso, molinate volvió a ser una molécula recomendada por su efectividad y rol dentro de las estrategias de control, para evitar el desarrollo de resistencia en las malezas, a otros productos químicos.

En 1970, el hualcacho y la hualtata eran las malezas más importantes en el cultivo del arroz (Sims y Alvarado, 1972). Sin embargo, el uso de los herbicidas selectivos para controlar las malezas de hoja ancha había reducido la importancia de la hualtata, favoreciendo una mayor infestación de hualcacho (Sim y Alvarado, 1972).

En 1972 el INIA presenta el primer ´Manual de Producción del Arroz`, con una sistematización de la información sobre el manejo de malezas (Sims y Alvarado, 1972). Las principales malezas presentes en el cultivo se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Principales malezas presentes en el cultivo del arroz en 1972.

Familia	Nombre científico	Nombre común
Gramíneas	*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.	hualcacho
	E. crus-galli var. *mitis* (Pursh) Peterm.	hualcacho
	E. crus-galli var. *frumentacea* (Roxb) Wight.	hualcacho
	E. crus-galli var. *zelayensis* (HBK) Hitche.	hualcacho nortino
	Paspalum distichum L.	chépica
Ciperáceas	*Cyperus esculentus* L.	chufa, coquillo, llaivún
	Cyperus rotundus L.	chufa, coquillo, llaivún
	Carex brongniartii Kunth.	cortadera
	Eleocharis palustris (L.) Roem. et Schultes.	quilenen
Alismatáceas	*Alisma plantago* L.	Hualtata
	Sagittaria chilensis Ch. et Schl.	lengua de vaca
Tifáceas	*Typha latifolia* L.	totora, batro, hinea
	Typha angustifolia L.	totora, batro, hinea

Fuente: Sims y Alvarado, 1972.

Para el control químico del hualcacho se utilizaba propanil (Stam F-34) y molinate (Ordram 6E y G) (Sims, 1969; Sims y Alvarado, 1972; Ormeño, 1981). El propanil es un herbicida de contacto, recomendado para aplicación de post-emergencia, en dosis de 4 a 6 kg ha^{-1} y con malezas de 3 a 4 hojas. Su aplicación se realizaba desaguando el arrozal para exponer las malezas al producto, debiéndose llenar el cuadro en un plazo no inferior a 48 h. El propanil no controlaba el hualcacho nortino, pero tenía un excelente control de malezas de hoja ancha. El molinate es un herbicida sistémico, recomendado para aplicarlo de pre-siembra en dosis de 3 a 4 kg ha^{-1}, y su incorporación al suelo con un rastraje. El llenado de los cuadros debía realizarse en un plazo no superior a las 48 h, después de la aplicación. Este producto sólo controlaba malezas gramíneas y su aplicación se complementaba con MCPA para el control de malezas de hoja ancha, pudiendo aplicarse desde principios de la macolla hasta antes del encañado (Ormeño, 1981). Para el control de la hualtata se recomendaba el uso del MCPA sal potásica, en dosis de 500 a 800 g de ingrediente activo por hectárea, aplicado de post-emergencia entre los 42 y 52 d después de la siembra. Para su aplicación era necesario desaguar los cuadros y permitir la exposición de la planta al herbicida, debiéndose llenar los cuadros 24 h después de la aplicación (Pardo y Cisternas, 1989).

Los equipos utilizados en la aplicación de los herbicidas eran los trineos, la bomba de espalda y los aviones (Foto 5). Estudios realizados para medir el efecto de las malezas en el rendimiento del grano de arroz, en condiciones experimentales, indicaban pérdidas que entre un 15 % a un 40 %, dependiendo del grado de infestación de las malezas (Sims, 1969; Sims y Alvarado, 1972). Ninguno de estos herbicidas (propanil y molinate), que eran los más utilizados en aquella época, era recomendado para controlar las malezas en arroz trasplantado, ya que ambos producían daños a la planta (Sims, 1969).

Foto 5. Aplicación de herbicidas mediante bomba de espalda y por avión. Gentileza F. Pardo y A. Toro.

A fines de esta década los herbicidas de mayor uso eran propanil, MCPA, bentazón, molinate y diferentes combinaciones de ellos. Las dosis usadas eran de 1 L de MCPA (750 g i.a. ha^{-1}) y 30 a 40 kg ha^{-1} (3-4 kg i.a. ha^{-1}) de molinate (Ordram 10 G). Las combinaciones de molinate y propanil (Ordram + Stam) y la mezcla propanil + bentazón-sodio (Basagran) presentaban un control efectivo del hualcacho y algunas malezas de hoja ancha y ciperáceas, en aplicaciones en los primeros estados de desarrollo de la maleza. Para complementar el control de malezas de hoja ancha se utilizaba, principalmente, MCPA en su formulación amina o sal potásica, aplicado desde mitad de macolla hasta inicio del encañado, para evitar daños a la planta de arroz (Pardo y Cisternas, 1989; Kogan et al., 2011).

A partir de 1980 se empiezan a realizar diversos estudios tendientes a conocer la importancia de las malezas presentes en el cultivo y a abordar, en forma más integral, su control.

En relación con el conocimiento de la importancia de las malezas en el sector arrocero y el cultivo, se realizaron dos prospecciones. La primera de ellas permitió identificar la presencia de malezas en los diferentes lugares en el arrozal, tales como cuarteles, pretiles, canales y bocatomas. En este estudio se identificó a 119 especies de malezas presentes en el arrozal, las que pertenecían a 29 familias. De estas malezas, un 93,3 % eran introducidas y sólo un 6,7 % nativas (San Martín y Ramírez, 1983). El segundo trabajo tuvo como objetivo conocer las malezas presentes sólo en el cultivo del arroz (Ormeño, 1983b). Este estudio permitió detectar a 25 especies de malezas que podrían causar pérdidas en la producción de arroz, de las cuales nueve fueron identificadas por primera vez en el país (Cuadro 2).

Cuadro 2. Principales malezas presentes en el cultivo del arroz en 1983.

Clase/Familia	Maleza
Monocotiledoneae	
Alismateceae	*Alisma plantago* L.
	Sagittaria chilensis Ch. et Echl.
Cyperaceae	*Carex brongniartii* Kunth
	Cyperus difformis L.*
	Cyperus eragrostis Lam.
	Cyperus strigosus L.*
	Cyperus aff. *megapotamicus* Spr.*
	Eleocharis ovata (Roth.) Roem. et Schutt.*
	Eleocharis palustris (L.) R. Br.
	Scirpus mucronatus (L.)*
Gramineae (Poaceae)	*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.
	Panicum dichotomiflorum Michx.*
	Paspalum dilatatum Poir.
	Paspalum distichum L.
Juncaceae	*Juncus bufonius* L.
	Juncus involucratus Steud. Ap. Buchenau.*
	Juncus procerus E. Mey.
Typhaceae	*Thypha angustifolia* L.
Dicotiledoneae	
Helantheae	*Bidens laevis* (L.) Br. Stern. & Pogg.*
Lythraceae	*Ammania coccinea* Rottb.*
	Lythrum hyssopifolia L.
Onagraceae	*Jussieua repens* var. *montevidensis* (Spreng) Munz.
Polygonaceae	*Polygonum persicaria* L.
	Polygonum lapathifolium L.

Fuente: Ormeño, 1983b. (*) Especies descritas por primera vez en el cultivo de arroz en Chile.

Las especies que presentaron una mayor frecuencia en el arrozal fueron *E. crus-galli*, *A. plantago*, *C. difformis*, *C. eragrostis*, *C. palustris*, *P. distichum,* y *J. repens* var. *montevidensis* (Ormeño, 1983b), donde el hualcacho era considerada como la maleza más importante en el cultivo del arroz (Ormeño, 1983a; 1983b; San Martín y Ramírez, 1983; Hernaíz, 1986a; 1986b; Grau et al., 1987; Ormeño y Grau, 1988).

Estudios realizados en el INIA indicaron que el período crítico de competencia de las malezas con el cultivo, es decir, el período en que la maleza produce el mayor daño por competencia, es aquel donde la planta de arroz tiene su máxima tasa de crecimiento, correspondiente al período que va desde la macolla a inicio de panícula (Ormeño, 1983a). Por lo tanto, durante ese período, las plantas del cultivo debían permanecer libres de malezas para que pudieran expresar su máximo potencial de rendimiento (Ormeño, 1983a; Pedreros y Alvarado, 1994).

La alta infestación de malezas y su control deficiente estaba asociada a diferentes prácticas culturales, como el uso del monocultivo, una deficiente preparación de los suelos (Alvarado y Pedreros, 1992) (Foto 6), escasa nivelación de los suelos que impedían un adecuado manejo del agua (Grau y Cisternas, 1986) y el uso deficiente del equipo de aplicación (bomba de espalda).

Foto 6. Deficiente preparación de suelo con uso de caballo y arado. Gentileza F. Pardo.

Asociado a esta situación, estaba el alto costo de los productos químicos que no permitía un uso más racional de los herbicidas (Grau et al., 1987). Además estaba el bajo contenido nutricional de los suelos (Araos y Rojas, 1976; Rojas et al., 1983) producto del uso intensivo de los mismos, ausencia de rotaciones (Rojas et al., 1991; 1992) y el tipo de cosecha realizada, donde se retiraba prácticamente todo el material (grano y paja) del campo para realizar la trilla con máquinas estacionarias, lo que significaba la imposibilidad de la incorporación de materia orgánica (rastrojo) al suelo, con la consiguiente pérdida de nutrientes, especialmente potasio. La situación se agudizaba debido el escaso uso de fertilizantes por parte de los agricultores.

En esa época, el agricultor sabía que las aplicaciones de fertilizantes, especialmente nitrógeno, aumentaba el rendimiento del cultivo, pero en el escenario de un deficiente control de malezas (Foto 7), la aplicación de nitrógeno implicaba un aumento de las malezas y una reducción del rendimiento y calidad del producto cosechado (Hernaíz, 1986a; Grau et al., 1987). A pesar de ello, los investigadores destacaban que el país poseía condiciones excepcionales para producir altos rendimientos de arroz, debido a la ausencia de plagas y enfermedades, alta luminosidad durante el desarrollo del cultivo y buena disponibilidad de agua (Grau et al., 1987).

Foto 7. Desuniformidad de aplicación de los herbicidas. Gentileza F. Pardo.

Ante esta situación, INIA planteó la necesidad de establecer un programa de trabajo que permitiera realizar un manejo técnico-económico más integral del cultivo. Para abordar ese programa, INIA y CIAT establecieron un Convenio de cooperación que permitió ejecutar el ´Plan nacional para el desarrollo de la producción de arroz en Chile` (Grau et al., 1987). Una de las actividades importantes consistía en evaluar la eficiencia de los herbicidas de bajo costo, que pudieran incentivar el mayor uso de ellos, y complementar a los productos recomendados en el país, además de incorporar otros factores agronómicos que permitieran abordar en forma integral el programa de producción de arroz a nivel nacional. Para ello se seleccionaron algunos productos que presentaron buena selectividad al arroz, como Saturno (benthiocarb) y propanil que expresaron una buena selectividad a temperaturas menores a 16 °C, además de Rainbow (fluroclorídona), un inhibidor de carotenoides y Furore (fenoxaprop) inhibidor de la enzima ACCasa que afectaba el metabolismo de lípidos que, a pesar de su menor selectividad, ofrecían un buen control de malezas a bajas temperaturas (13-16 °C) (Grau et al., 1987). El trabajo estuvo acompañado de un fuerte componente de difusión que permitió mejorar las condiciones productivas del cultivo.

Durante la década de 1980 se introdujo una nueva familia de herbicidas al país, las sulfonilureas, que presentaron varias ventajas: buena selectividad en aplicaciones de post-emergencia, alta eficacia, uso de dosis bajas y amplio espectro de control. Los primeros productos fueron el pyrazozulfuron-etil (Sirius) y ciclosulfamuron (Orisa), los que, además de controlar hualcachos, controlaban malezas de hoja ancha (Kogan et al., 2011). Sirius se podía mezclar con Molinate (Ordram) en dosis de 2,5 a 3,5 L ha^{-1}, con aplicaciones al agua 10 a 20 d después de la siembra (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Entre 1980 y 1987, se introdujo al país una nueva molécula, también de la familia de las sulfonilureas, llamada bensulfurón (Londax) que marcó un hito en el control de malezas ciperáceas y de hoja ancha, en dosis de 60-72 g i.a. ha^{-1} (100 a 120 g ha^{-1} de Londax), aunque también realizó un control de hualcacho (Pardo y Cisternas, 1990), esta dosis, considerada baja para los agricultores en la época, produjo también un cambio importante en la cultura de los agricultores, acostumbrados a la aplicación de kilogramos por hectárea de productos. Una vez que se logró introducir esta molécula al país, hubo un gran avance en el control de malezas en el cultivo del arroz. Dado los buenos resultados de control, los agricultores comenzaron a usar este producto en forma continuada hasta el año 2000, lo que generó una gran presión de selección sobre este mecanismo de acción (ALS), hasta que se comenzó a notar una reducción en la efectividad del producto, lo que muy probablemente se debió a la aparición de biotipos de hualcachos resistentes al herbicida.

Adicionalmente, desde 1988-1989 se empezó a introducir al sector arrocero la práctica de la nivelación de suelos (Foto 8). Ello permitió habilitar terrenos, diseñar cuadros más amplios y hacer un mejor manejo del agua, lo que contribuyó a mejorar la eficiencia de los herbicidas y aumentar los rendimientos unitarios obtenidos por los agricultores y, consecuentemente, el rendimiento promedio del país. A pesar de que la nivelación de los suelos tomó varios años en ser adoptada masivamente por los agricultores, hoy día prácticamente un alto porcentaje de los suelos sembrados con arroz están nivelados. Ello permitió el uso más masivo de las sulfonilureas, aunque el sistema de aplicación más comúnmente utilizado, la bomba de espalda, no era el más adecuado ya que las bajas dosis recomendadas eran de compleja adopción en la práctica. Por otro lado, los herbicidas bensulfurón (Londax), pyrazozulfuron-etil (Sirius) y Cyclosulfamuron (Orisa) vieron reducida su efectividad. El uso continuado de las sulfonilureas originó el efecto de ´resistencia` de las malezas a este grupo de herbicidas en los años 2000, lo que implicó una reducción en su eficiencia del control.

Foto 8. Barbecho químico en arroz en suelo nivelado. Gentileza F. Pardo.

A principios de 1990, las principales malezas presentes en el cultivo del arroz eran las que se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Principales malezas presentes en el cultivo del arroz en 1995.

Familia	Nombre científico	Nombre común
Alismateceae	*Alisma plantago-aquatica*	hualtata
	Sagittaria montevidensis spp. *chilensis*	lengua de vaca, rosa de agua
Cyperaceae	*Carex brongniartii*	cortadera
	Cyperus difformis	cortadera, lleivún
	Cyperus eragrostis	cortadera, lleivún
	Eleocharis palustris	quilenen
	Eleocharis ovata	pasto del agua
	Scirpus californicus	totorilla, estoquillo
	Cyperus strigosus	cortadera
Poaceae	*Echinochloa crus-galli*	hualcacho
	Paspalum distichum	chépica
Thyphaceae	*Thypha augustifolia*	batro, totora
Zannichelaceae	*Zannichellia palustris*	cachaguita
Lythraceae	*Lythrum hyssopifolia*	romerillo
Onagraceae	*Ludwigia peploides* ssp *montividensis*	pasto de la rana

Fuente: Alvarado y Hernaíz, 1995.

En esta década, las malezas más importantes, por las graves pérdidas que causaban en rendimiento del arroz, eran hualcacho, hualtata, quilenen y chépica (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Durante este período se pudo distinguir la presencia de varias especies de hualcachos en el país como *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli,* E. *crus-galli* var. *mitis*, *E. colonum,* y *E. crus-pavonis* (Mar-

ticorena y Quezada, 1985). Sin embargo, un estudio permitió identificar a las siguientes especies: *E. oryzoides* (hualcacho nortino o blanco), *E. crus-pavonis* (hualcacho o hualcacha), *E. crus-galli* var. *crus-galli* (hualcacho común) y *E. crus-galli* var. *mitis* (hualcacho negro o morado) (Ormeño y Reyes, 1989).

Entre las especies identificadas, el hualcacho común y el hualcacho nortino o blanco, eran las más frecuentes en los arrozales del país (Ormeño, 1992). Estas especies por sí solas pueden causar pérdidas importantes en el rendimiento, las que pueden variar entre un 25,5 % y un 49,1 % (Ormeño, 1992).

Los herbicidas recomendados en el año 1995 para el control de malezas en arroz se presentan en el Cuadro 4, junto con su época y forma de aplicación y dosis.

Cuadro 4. Herbicida, forma de aplicación, dosis, volumen de agua y época de aplicación. 1995.

Herbicida (i.a./nombre comercial)	Forma de aplicación	Dosis (i.a.)	Volumen de agua (L ha^{-1}) terrestre/aéreo	Época de aplicación
Propanil (Stam)	Bomba de espalda o avión	4,0-5,6 kg i.a. ha^{-1}	200-400/50-80	Post-emergencia (40 d después de siembra)
Molinate (Ordram)	Riego inundación	3,7 kg i.a. ha^{-1}	-	Pre-siembra
	Bomba de espalda o avión	3,7 kg i.a. ha^{-1}	150-200/40	10 a 30 DDS; malezas de 2 a 10 cm de altura
	Manual o avión arroz inundado	3,0-4,0 kg i.a. ha^{-1}	-	a) 10-30 DDS, maleza 2-10 cm de altura b) presiembra incorporado
Propanil + Molinate (Arrosolo 3-3E)	Bomba espalda, o avión	2,5 +2,5 kg i.a. ha^{-1}	100-200/40	Post-emergencia, malezas 2-10 cm de altura
Bensulfuron metil (Londax)	Bomba espalda, o avión sobre lámina de agua de 10 cm por 6 d	60 g i.a. ha^{-1}	50/30	10 DDS
Pirazosulfuron (Sirius)	Bomba espalda, o aérea	50 g i.a. ha^{-1}	80-150/40-60	10-20 DDS

Fuente: Alvarado y Hernaíz, 1995.; i.a.= ingrediente activo; p.c.= producto comercial; DDS= días después de la siembra.

A finales del 2007, se ve que las principales malezas presentes en el cultivo de arroz fueron cambiando en el tiempo y se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Principales malezas y algas presentes en el cultivo del arroz. 2007.

Familia	Nombre científico	Nombre común	Reproducción
Poaceae	*Echinochloa crus-galli* var. *mitis*	hualcacho morado o negro	Semillas
	E. crus-galli var. *crus-galli*	hualcacho común	Semillas
	E. oryzoides	hualcacho blanco	Semillas
	E. crus-pavonis	hualcacho	Semillas
	Paspalum paspalodes	chépica	Semillas, rizomas, estolones
	Oryza sativa	arroz rojo	Semillas
Alismataceae	*Alisma plantago-aquatica*	hualtata	Semillas, bulbos
	Alisma lanceolatum	hualtatilla	Semillas, bulbos
	Sagittaria montevidensis subsp. *chilensis*	lengua de vaca	Semillas, bulbos
Ciperaceae	*Cyperus difformis*	cortadera, lleivún	Semillas
	Cyperus eragrostis	cortadera, lleivún	Semillas
	Scirpus mucronatus	pasto cabezón, totorilla, estoquillo	Semillas, rizomas
	Eleocharis palustris	quilenen	Semillas, rizomas
	Eleocharis ovata	pasto de agua	Semillas, rizomas
Onagraceae	*Ludwigia pepploides* ssp. *montevidensis*	pasto de la rana	Semillas, tallos, raíces
Algas	*Chara braunii*	chara	Esporas, división celular
	Nitella acuminata	nitela	Esporas, división celular
		lama	Esporas, división celular

Fuente: Pedreros y Kramm, 2007.

Las principales malezas que estaban presentes en el cultivo eran el hualcacho común, negro y blanco, los que podían causar pérdidas que variaban entre un 2,5 % a un 49,1 % en el rendimiento del cultivo. El segundo grupo de malezas correspondía a las ciperáceas que aumentaron su importancia en las zonas donde había un buen control de hualcacho. Estas malezas podían causar pérdidas en el rendimiento del cultivo que fluctuaban entre un 15,6 % y un 44, 7 %. El tercer grupo de malezas eran las alismatáceas que podían generar pérdidas en rendimiento entre un 11 % y un 67 % con poblaciones de 100 plantas m^{-2} (Pedreros y Kramm, 2007). Otros trabajos señalaban que un deficiente control de malezas podía reducir el rendimiento entre un 23 a 52 % (Ormeño, 1983a; 1992; Alvarado et al., 1985; Ormeño, 1992; Alvarado y Hernaíz, 2001).

Un estudio posterior logró determinar que las especies de hualcacho tienen diferentes requerimientos de temperatura y que respondían diferencialmente a distintas alturas de la lámina de agua (Pedreros y Alvarado, 1994). Es así como el hualcacho blanco presentó una mayor emergencia a 24 °C comparada con 18 °C y su crecimiento no se afectó con una altura de agua de 18 cm. Por el contrario, el hualcacho común disminuyó en un 50 % su emergencia con una altura de agua de 10 cm y a 18 °C, pero no afectó su crecimiento con 24 °C. Todo ello indicaba que el hualcacho blanco necesitaba mayor temperatura para crecer y que era menos afectado por la altura de la lámina de agua (Pedreros y Kramm, 2007).

Durante el año 2003 se introdujo al país el herbicida Ricer (penoxsulam) como producto experimental, el cual fue lanzado comercialmente en 2006. El Penoxsulam es miembro de la familia de sulfonamida triazolopyrimidine, de acción sistémica que se absorbe principalmente por las hojas, y secundariamente por las raíces. Su modo de acción es la inhibición de la enzima Acetolactasa (ALS) que impide la síntesis de varios aminoácidos y controla, principalmente, *Echinochloa* spp. (100 %), *A. plantago-acuatica* (80 % - 100 %), *Schoenoplectus mucronatus* (50 % – 80 %) y *Cyperus difformis* (80 % – 100 %) (Kogan et al., 2011). Estudios realizados sobre su persistencia indican que se disipa rápidamente del agua y más lentamente de los sedimentos (Kogan et al., 2012). Puede ser aplicado en siembras inundadas sobre el agua, solo o en mezcla con molinate, o en aplicaciones de post-emergencia del cultivo y de las malezas.

A fines de la década del 2000, los principales herbicidas disponibles en el mercado para el control de malezas en el cultivo de arroz se indican en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Mecanismo de acción de los herbicidas utilizados en el control de malezas en el cultivo del arroz. Año 2007.

Mecanismo de acción	Ingrediente activo	Nombre comercial	Principales malezas afectadas
Inhibidores de enzima Acetolactato Sintetasa (ALS): Sulfonilureas, Sulfonamidas, Pirimidinilbenzoato.	bensulfuron	Londax, Stoke	Alimastáceas y Ciperáceas
	ethoxysulfuron	Sunstar	
	metsulfuron	Ajax (sólo Ajax contaba con registro para arroz)	
	pyrazozulfuron-ethyl	Sirius	
	cyclosulfamuron	Oryza	
	penoxsulam	Ricer	
	bispiribac-sodio	Nominee	hualcacho y algunas Ciperáceas
	piribenzoxima	Pyanchor	
Inhibidores de acetil coenzima carboxilasa (ACCasa)	cyhalofop-butil	Clincher	Gramíneas
Inhibidores de fotosíntesis	bentazona-sodio	Basagran, Bentax	Ciperáceas y Alismatáceas
	propanil	Stam	
Reguladores de crecimiento (auxínicos)	MCPA amina y sal potásica	MCPA 750 Weedout	hualtata
	2,4 D amina	2,4 D amina	hualtata, Lengua de vaca
	quinolin carboxilicos		
	quinclorac	Facet, Exocet	hualcachos
Inhibidor de síntesis de lípidos	molinate	Molirox	hualcachos

Fuente: Pedreros y Kramm, 2007.

A partir de la década del 2000, el control de las malezas ha ido evolucionando hacia la incorporación del concepto de ´manejo integrado`, iniciado en la década de 1980, donde el barbecho químico, la preparación de suelo oportuna, la siembra en la fecha adecuada, el uso de semilla certificada, la introducción de nuevos herbicidas con diferentes mecanismos de acción, la rotación de herbicidas, el uso de mezclas de herbicidas y las épocas de aplicación de herbicidas, juegan un papel importante.

Incluso se han desarrollado cambios muy importantes en la forma de aplicar los herbicidas como, por ejemplo, la aplicación de combinaciones de molinate + Kixor (Saflufenacilo), o quinclorac + Kixor, complementado con aplicaciones de MCPA, donde la aplicación de los herbicidas se realiza directamente al agua. Esto permite una mejor distribución y contacto del herbicida con las malezas, aumentando la eficiencia del control de todas las malezas y la selectividad del MCPA al cultivo de arroz (Foto 9). Por otro lado, estas mezclas son una buena herramienta anti-resistencia, pues utilizan herbicidas de diferentes mecanismos de acción, manteniendo el nivel del agua en los cuadros después de la siembra, lo que reduce la germinación de malezas, especialmente hualcacho, permitiendo el ahorro de agua y evitando rellenar los cuadros con agua fría, lo que afecta el crecimiento del cultivo.

Foto 9. Foto que muestra un buen control de malezas en arroz con una mezcla de molinate, bensulfuron, byspiribac y MCPA.

Actualmente, la siembra directa ha producido un cambio fundamental en la estrategia de control de malezas en el cultivo del arroz. Por un lado, se han mejorado las condiciones de la siembra propiamente tal, al incorporar mayores grados de mecanización del cultivo y, por otro, ha permitido la aplicación de herbicidas pre-emergentes que han ayudado a mejorar el control temprano de las malezas y a reducir el riego de aparición de la resistencia a herbicidas. El sistema de siembra directa también ha contribuido a mejorar el sistema de aplicación, de uno manual a uno mecanizado, lo que permite un mejor manejo de los productos y aumenta la eficacia del control, todo lo cual favorece el incremento en los rendimientos.

En el año 2018, se actualiza y resume la situación actual de las especies de malezas más frecuentes en siembra semilla pregerminada (Cuadro 8) en el mercado nacional (Henríquez et al., 2018).

Cuadro 8. Principales malezas presentes en el cultivo de arroz en 2018.

Familia	Nombre científico	Nombre común	Ciclo	Reproducción
Poaceae	*Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli*	hualcacho común	Anual	semillas
	E. oryzoides	hualcacho nortino	Anual	semillas
	E. crus-galli var. *mitis*	hualcacho negro o morado	Anual	semillas
	E. colona	hualcacho morado	Anual	semillas
	E. crus-pavonis	hualcacho blanco	Anual	semillas
	Paspalum distichum	chépica	Perenne	semillas, estolones, rizomas
Ciperáceae	*Cyperus difformis*	cortadera	Anual	semillas
	Shoenoplectus mucronatus	pasto cabezón	Perenne	semillas, rizomas
	Eleocharis palustris	quilenen	Perenne	semillas, rizomas
Alismataceae	*Alisma plantago-aquatica*	hualtata	Perenne	semillas, rizomas
	Alisma lanceolatum	hualtatilla	Perenne	semillas, rizomas
	Sagittaria montevidensis spp. *chilensis*	lengua de vaca	Perenne	semillas, rizomas
Onagraceae	*Lutwigia peploides* spp. *montividensis*	pasto de la rana	Perenne	semillas, rizomas
Especies más frecuentes en siembra directa				
Poaceae	*Leptocloa* spp.	cola de buey		
	Eragrostis pilosa	panicela pilosa	Perenne	semillas
	Lachnagrostis filiformis	pajamon		
	Leptochloa spp.	pasto moro	Anual	semillas
Polygonacea	*Polygonum persicaria*	duraznillo	Anual	semillas
Lytraceae	*Lythrum hyssopifolia*	hierba del toro	Anual	semillas

Fuente: Henríquez et al., 2018.

Una nueva prospección sobre las malezas presentes en el sistema de siembra inundado y directa determinó un total de 26 taxa (un alga y 25 angiospermas). En la Clase Monocotiledoneae, las familias más representadas fueron Cyperaceae y Poaceae, mientras que en la Clase Dicotiledoneae fueron Asteraceae y Polygonaceae. Las especies introducidas predominaron sobre las nativas, donde el componente europeo representó un 53 %. Las plantas acuáticas fueron un 50 %, las sumergidas un 11 % y las de hojas flotantes un 8 %. En la siembra inundada se encontraron 15 malezas y 22 en siembra directa, con once malezas que comparten ambos sistemas. Se detectaron también nueve especies nuevas para los arrozales y un nuevo registro para la flora chilena (*Bacopa rotundifolia*, Plantaginaceae) (Vallejos, 2018).

Actualmente, el control de malezas usando herbicidas se puede realizar en uno o más de estos momentos: 1) en pre-siembra o barbecho químico, 2) en pre-emergencia o en ´punto de aguja`, y 3) en

post-emergencia. Las aplicaciones se realizan utilizando bomba pulverizadora de espalda, equipo pulverizador hidráulico conectado al tractor con rueda lenteja, avión o drones (Foto 10) (Henríquez et al., 2018). Los productos disponibles en el mercado nacionales se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Herbicidas disponibles para el control de malezas en arroz en 2018.

Mecanismo de control	Ingrediente activo	Nombre comercial	Dosis (i.a. ha^{-1})	Época de aplicación	Maleza controlada
Inhibidores de Aceto-lactato Sintetasa (ALS)	penoxsulam	Ricer	40-50 g i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualcacho, hualtata
Inhibidores de Acetil Coenzima Carboxilasa (ACCasa)	cyhalofop-butil	Clincher	550-720 g i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualcacho
Inhibidores de fotosíntesis	bentazon	Basagran, Bentax	1,0-1,5 kg i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualtata, lengua de vaca, cortadera, pasto cabezón
	saflufenacilo	Heat	52-70 g i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualtata, cortadera, pasto cabezón
Inhibidores de crecimiento	florpyrauxi-fen-benzyl (Rinskor™)	Loyant	30 g i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualcacho, hualtata, cortadera
	quinclorac	Facet, Exocet	400-500 g i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualcacho
	MCPA sal Amina/MCPA sal K	MCPA, U-46 M-Fluid/ MCPA 400 sal K	0,75/0,6-0,9 kg i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualtata, lengua de vaca, cortadera, pasto cabezón
	triclopyr	Garlon-4	200-400 g i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	pasto cabezón
Inhibidores de ácidos grasos	molinate	Brioso/Molirox	3,0-4,5 kg i.a. ha^{-1}	Post-emergencia	hualcacho
Inhibidores de carotenoides	clomozona	Dakota 48EC, Command 4 EC	240-480 g i.a. ha^{-1}	Pre-emergencia	hualcacho
Inhibidores de crecimiento (mitosis)	pendimetalina	Espada, Espectro, Herbadox	0,6-1,0 kg i.a. ha^{-1}	Pre-emergencia	hualcacho
Inhibidores de EPSPs	glifosato (varias formulaciones)	Varios	0,7-3,0 kg i.a. ha^{-1}	Pre-siembra; pre-emergencia	amplio espectro

Fuente: Henríquez et al., 2018.

Foto 10. El uso de dron en aplicaciones de herbicidas ha mostrado una alta eficiencia. Gentileza A. Toro.

A pesar de los avances logrados, todavía persisten algunos problemas prácticos, como es el caso de la época oportuna de la aplicación de MCPA. Entre los años 1970 a 1990 se recomendaba realizar la aplicación del MCPA entre los 40 a 45 d después la siembra, lo cual está muy arraigado en los productores y técnicos arroceros, por lo que la recomendación actual de aplicarlo a mediados de macolla, ha sido de compleja adopción. La aplicación en la época no recomendada, antes del inicio de la macolla, produce daño al arroz, pues el MCPA es fitotóxico al cultivo de arroz y puede producir graves pérdidas en rendimientos (Foto 11).

Foto 11. Aplicaciones de MCPA fuera de la época recomendada han causado daño al arroz. Gentileza F. Pardo.

El registro en Chile del herbicida Triclopyr (Garlon 4) con mayor selectividad que MCPA en los primeros estadíos a partir de dos a tres hojas del cultivo, siguiendo el uso del mismo activo en California (Grandstand), permite el control de ciperáceas y alismatáceas en infestaciones tempranas después emergencia del cultivo.

Malezas resistentes a herbicidas en el cultivo arroz

Se entiende por resistencia la habilidad de ciertos biotipos de no afectarse y reproducirse, aún después de estar expuestos a una dosis de etiqueta de un determinado herbicida que normalmente los controla. Esta característica se hereda a su progenie, lo que quiere decir que las plantas originadas por sus semillas también resistirán los tratamientos a estos mismos herbicidas (HRAC).

En el desarrollo de la resistencia de los herbicidas se debe considerar, por un lado, que los herbicidas pueden actuar en un sitio específico, por ejemplo, las sulfonilureas que afectan una proteína

(enzima) específica (Acetato lactato sintetasa), o aquellos de acción múltiple, como los herbicidas reguladores de crecimiento (MCPA, Garlon, Loyant) que pueden afectar más de un sitio. Por otro lado, también se debe tener en cuenta que los herbicidas poseen un mecanismo de acción (afectando síntesis de aminoácidos, de lípidos, o síntesis de clorofila, entre otros) que se refiere al sitio de acción, como ejemplo Cyhalofop metil (Clincher) que inhibe la enzima Acetil coenzima A, la cual actúa en la síntesis de lípidos (HRAC).

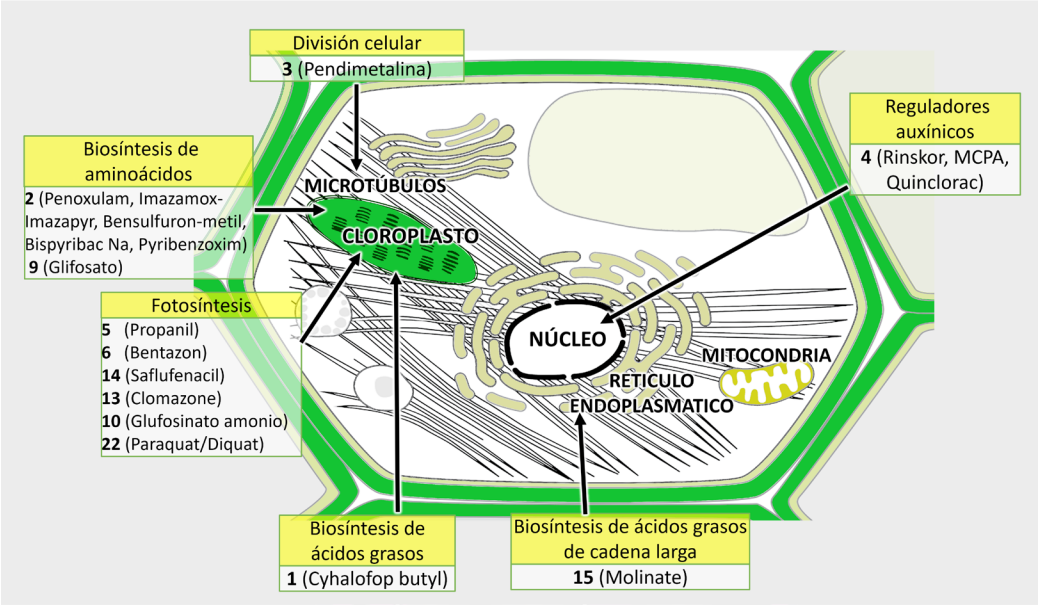
A nivel global existen, aproximadamente, 300 ingredientes activos y 28 mecanismos de acción. Sin embargo, en el cultivo de arroz el número de moléculas es limitado (Cuadro 10).

Cuadro 10. Herbicidas de uso actual en el cultivo arroz en Chile.

Espectro/ Mecanismo de acción	Ingrediente activo	Marca	Clasificación HRAC/ WSSA	Grupo químico	Acción
Control de malezas gramíneas					
Inhibidor de ACCasa	cyhalofop	Clincher	1	Aryloxyphenoxypropionates	Sistémico
Inhibidor de ALS	penoxulam	Ricer	2	Triazolopirimidinas	Sistémico
	imazamox + imazapyr	Euroligtning	2	Imidazolinonas	Sistémico
	bispiribac Na	Nominee	2	Pyrimidilbenzoatos	Sistémico
	pyribenzoxin	Pyanchor	2	Pyrimidilbenzoatos	Sistémico
Imitador de auxinas (AIA)	florpyrauxifen-benzyl (Rinskor™)	Loyant	4	Arylpicolinatos	Sistémico
Inhibidores de síntesis de lípidos	molinate	Brioso	8	Thiocarbamatos	Contacto
Inhibidores síntesis membrana celular	quinclorac	Facet, Exocet	4	Quinoline carboxylic acids	Sistémico
Control de malezas latifoliadas					
Imitador de auxinas (AIA)	triclopyr	Garlon	4	Pyridyloxy carboxylatos acids	Sistémico
	MCPA	MCPA/U46	4	Phenoxy carboxylic acid	Sistémico
Inhibidor sistema fotosistema II	bentazon	Bentax, Basagran	6	Benzothiadiazinone	Contacto
Inhibidor de Protox (PPO)	saflufenacil	Heat	14	N phenil imidas	Contacto

Fuente: www.weedscience.org. / HRAC es la clasificación de los MOA del HRAC y de la WSSA.

Para ejemplificar los sitios de acción de los herbicidas utilizados en arroz, es posible usar el siguiente esquema (Figura 1).



Adaptado: Délye et al., 2013; Heap, 2020; Binder et al., 2014.

Figura 1. Clasificación de herbicidas según sitio de acción. Comité Global de Manejo de Resistencia (Herbicide Resistance Action Committee, HRAC).

Básicamente es posible encontrar dos tipos de resistencia:

a) La resistencia cruzada a herbicidas en una planta o biotipo con el mismo sitio acción, pero pertenecientes a diferentes familias químicas, como se ha observado en la zona arrocera a bensulfuron metil y penoxulam. Por ello, se debe ser cuidadoso en el manejo de los herbicidas de las imidazolinonas, selectivos en los cultivos Clearfield, debido a que comparten el mismo mecanismo de acción con otros herbicidas que son inhibidores de la enzima ALS.

b) La resistencia múltiple de una planta o biotipo a herbicidas con diferentes sitios de acción, como a quinclorac y a cyhalofop metil y/o a penoxulam (Beffa et al., 2019).

A nivel mundial, los primeros antecedentes de resistencia de malezas provienen del año 1957, cuando se reportaron los primeros casos de resistencia a 2,4 D en *Commelia difusa* en Hawai y en *Daucus carota* en Canadá (Hilton, 1957; Switzer, 1957). Actualmente, se han informado 262 especies de malezas resistentes a herbicidas (152 dicotiledóneas y 110 monocotiledóneas). Las malezas han desarrollado resistencia a 23 de los 26 sitios de acción de herbicidas conocidos y a 167 herbicidas en 92 cultivos de 70 países (www.weedscience.org 2020).

En arroz, los primeros informes de resistencia de malezas aparecieron en Filipinas en el año 1983, con la resistencia de *Sphenoclea zeylanica* al 2,4 D y en Grecia en 1986, con resistencia de *E. crus-galli* var. *crus-galli* a propanil. En la actualidad se han reportado 164 casos de resistencia a malezas (gramíneas, ciperáceas y latifoliadas) con diferentes mecanismos de acción (www.weedscience.org 2020).

En Chile, el molinate fue usado por más de una década sin reportes de fallas de control de hualcacho, incluso hasta el día de hoy, probablemente por actuar con un diferente mecanismo de acción

a los herbicidas usados en el país. Se utiliza en cultivo inundado a pocos días después de la siembra y antes de la emergencia del cultivo sobre el nivel del agua. Sin embargo, con la aparición de herbicidas del grupo de las sulfonilureas (grupo B/2, inhibidores de la enzima ALS, Acetato lactasa sintetasa que afecta síntesis de lípidos), en la década de 1980 se produjo gradualmente el reemplazo absoluto del molinate, debido al mayor espectro de control, menor olor, baja dosis y residualidad que ofrecieron ciclosulfamuron (Oryza), pirazosulfuron (Sirius) y posteriormente bensulfuron (Londax).

Estos herbicidas, utilizados en Chile por casi 15 años en forma repetitiva cada temporada y, en muchos casos sobre el mismo suelo en rotaciones arroz-arroz, generaron una presión de selección sobre la hualtata (*Alisma plantago-acuatica*) y hualcacho (*Echinochloa* spp.), permitiendo la sobrevivencia de ciertas plantas de estas especies (biotipos) a la aplicación de sulfonilureas. Por esta razón, se afirma que el desarrollo de resistencia en el campo es un proceso de selección que se ha generado aplicando herbicidas con el mismo o similar modo de acción, produciendo lo que se llama ´presión de selección`. Las gramíneas son el grupo de malezas donde más se han informado casos de resistencia, entre las que se encuentran las diferentes especies de hualcacho, (*Echinochloa* spp.) (Fisher et al., 1993; 2000; Valverde, 2007; Yasuor et al., 2008; Riar et al., 2013; Matzenbacher et al., 2015).

También se ha reportado resistencia en dos especies de malezas que afectan el cultivo arroz, en *Alisma plantago-acuatica* (Figueroa et al., 2008) y *Shoenoplectus mucronatus* (Cruz-Hipólito et al., 2009); ambas resisten a herbicidas inhibidores de ALS (grupo 2). Hualtata presenta resistencia a bensulfuron-metil y el pasto cabezón a bispyribac-sodium, bensulfuron-metil, pyrazosulfuron-etil, ethoxysulfuron, cyclosulfamuron e imazamox.

En el año 1998, con el lanzamiento de cyhalofop-metil (Clincher) se aporta un nuevo mecanismo de acción, inhibidor de la enzima ACCasa que afecta la síntesis de lípidos. Pertenece al grupo de los aryloxyphenoxypropionates (FOPs), clasificado por el HRAC en el grupo 1. Este herbicida sistémico necesita el follaje expuesto de las gramíneas para lograr buena cobertura y absorción. El herbicida se transloca rápidamente y aporta al control sobre chépica, la única especie gramínea perenne en el cultivo arroz en Chile, que se multiplica por medio de semillas y rizomas. Durante los primeros años, Clincher se utilizó por su alta eficacia como tratamiento tardío; sin embargo, más adelante se incluyó en los tratamientos tempranos con malezas en los primeros estados vegetativos, donde este tipo de herbicidas presenta mayor eficacia que en estados fenológicos más tardíos. Como todos los graminicidas de este grupo, es relevante el uso de coadyuvantes.

Posteriormente, se registra un herbicida regulador de crecimiento y de gran selectividad al cultivo. Se trata de quinclorac (Facet) del grupo 4, también de actividad post-emergente con alta eficacia en control de hualcacho, sumando una nueva herramienta al control químico de malezas gramíneas con un mecanismo diferente de acción. Algunos años más tarde, en 2006, la industria lanzó un nuevo herbicida cuyo ingrediente activo penoxulam (Ricer), del subgrupo de las triazolopirimidina (diferente al subgrupo de las sulfonilureas), pero del mismo mecanismo de acción, era inhibidor de la enzima ALS y clasificado también en el grupo 2. Este producto, aunque comparte el mismo grupo, remplazó a la última sulfonilurea (bensulfuron metil) debido al excelente control que demostró inicialmente sobre hualtatas *(Alisma plantago)* y hualcachos *(Echinocloa* spp.*)* que habían perdido sensibilidad a bensulfuron. Además, penoxulam ofrecía eficacia en control parcial (40 % - 60 %) de ciperáceas, como pasto cabezón (*Shoenoplectus mucronatus)* y cortadera (*Cyperus difformis*).

Otros herbicidas que también se comercializaron algunas temporadas en la década de 1990 fueron bispiribac sodio (Nominee) y pyribenzoxim (Pyanchor), ambos pertenecientes, también, al sub grupo de la clasificación del HRAC 2 ´pyrimidinyl benzoatos`, inhibidores de la ALS, aunque no pudo demostrar su eficacia en el control de las malezas en el sector arrocero chileno.

Sin embargo, después de una década de uso repetitivo de Ricer, al ser sometido a una condición de alta presión de uso de herbicidas ALS, comenzó a perder eficacia a nivel de campo, época en la cual se incentivó el uso en la post-emergencia del arroz y de hualcacho, mezclas de dos herbicidas, seleccionando de los siguientes tres ingredientes activos: penoxulam-quinclorac-cyhalofop

metil. Actualmente, se observaban grandes pérdidas de rendimiento debido a controles irregulares, principalmente en biotipos de hualcacho no bien controlados con los tratamientos ya mencionados.

En el año 2017 se registró en Chile Loyant, un nuevo herbicida hormonal de tipo auxínico (grupo 4/O), cuyo ingrediente activo es flopirauxifen bencilo (Rinskor), de la familia de los arilpicolinatos. Este herbicida es sistémico y selectivo a todas las variedades y tipos de arroz (híbridos, variedades clearfield, variedades *indica* y *japonica*), se aplica desde 2 a 3 hojas. En cuanto a su afinidad a sitios de acción de las auxinas sintéticas, ésta es mayor al sitio AFB5m que al sitio TIR1, en relación a otros herbicidas reguladores de crecimiento. Loyant es recomendado para el control de un amplio espectro de malezas, incluyendo ciperáceas y latifoliadas como *Alisma* spp., *Chenopodium*, *Sagitaria*, *Amarantus*, *Ambrosia*, entre otras, incluyendo las diversas especies y biotipos de hualcachos. Es muy activo con sólo 30 g i.a. ha^{-1}, esto es, utilizando menor dosis que el resto de los graminicidas del mercado, por lo que se considera que posee un buen perfil ambiental y toxicológico (Foto 12).

Foto 12. Efecto de Loyant y Garlon sobre el control de maleza. Parral, temporada 2017-2018.

En las últimas temporadas se ha desarrollado la siembra directa que, entre otros beneficios, permite la utilización de herbicidas suelo activo, con un mecanismo de acción diferente a los post-emergentes, lo que permite apoyar el manejo anti-resistencia. Básicamente, el único ingrediente activo de contacto y residual que se encuentra registrado es el clomazone y, aunque aún no cuenta con registro oficial, la pendimetalina también es usada sola o de preferencia en mezclas. La pendimetalina pertenece al grupo de las Dinitroanilinas, y afecta el proceso mitosis en crecimiento celular. Está clasificado en el grupo 3. Su ingrediente activo es de baja movilidad en suelo y se utiliza como pre-emergente de las malezas y del cultivo, afectando principalmente malezas gramíneas y algunas latifoliadas. Clomazone pertenece al grupo de las Isoxazolidinonas. Afecta la enzima fitoeno desaturasa (PDS) e inhibe la síntesis de carotenoides (pigmentos), generando el típico ´bleaching` o blanqueamiento. Se clasifica en grupo 13 y se absorbe por brotes y raicillas, deteniendo el crecimiento de gramíneas y de algunas malezas de hoja ancha. Ambos se aplican inmediatamente después de la siembra y previo a la emergencia del cultivo y de las malezas.

El mejor control de malezas debe considerar un manejo Integral, considerando aspectos agronómicos del cultivo (manejo suelo, calidad semilla, rotaciones), donde los herbicidas sean sólo una parte de la solución y donde su manejo racional sea importante, considerando rotaciones de ingredientes activos en cada temporada y durante la misma temporada de siembra.

Presencia del arroz maleza (arroz rojo) en Chile

Las primeras referencias de la presencia del arroz rojo en Chile se remontan a los inicios del cultivo del arroz en el país (Silva, 1937; Opazo, 1939; Villalobos, 1941; Astorga, 1944), momento en el

que se identifica como una maleza muy dañina, al ser una planta muy difícil de eliminar del cultivo en las siembras realizadas al voleo. No ocurre lo mismo en las siembras ejecutadas mediante el sistema almacigo - trasplante, donde se le podía eliminar en forma mecánica (Opazo, 1939). Esta situación indicaba la probabilidad de que el arroz rojo haya sido introducido al país en las primeras importaciones de semillas realizada por los agricultores.

Un análisis de la calidad de la semilla de arroz, llamada ´semilla nacional` utilizada en el país, demostró que además de ser una mezcla de genotipos, poseía prácticamente un 50 % de plantas que producían granos de color rojo, señalándose que la presencia de arroz rojo en el campo había ido aumentando año tras año, llegando a producir una importante contaminación en las variedades comerciales a principios de 1940. Ésta podía llegar a un 4 % a 5 %, aunque su presencia no debería ser superior al 0,5 % (Theune, 1941; Astorga, 1944).

Otros estudios realizados tendientes a evaluar la variabilidad de muestras de arroz rojo colectadas en la zona, detectaron una amplia variabilidad fenotípica en esta maleza. Es así como en 1940, en la ´semilla nacional`, se detectaron 11 tipos diferentes de plantas con granos rojos, plantas que además poseían nudos de color negro, espiguillas aristadas, panojas de color amarillo oscuro y diferentes tipos de grano (Theune, 1941). Posteriormente, otro estudio señaló la presencia de 17 ecotipos de arroz rojo que se caracterizaban por poseer diferentes tipos de grano (cortos, intermedios y largos), presencia o ausencia de coloración en los nudos, y presencia o ausencia de aristas (Alvarado et al., 2007). Este estudio detectó también un grupo específico de plantas incluidas en las variedades comerciales ´Oro`, ´Diamante-INIA` y ´Brillante-INIA` que presentaban el pericarpio rojo. Ello indicaba la posibilidad de cruzamientos naturales entre la maleza y las variedades comerciales. El análisis multivariado indicó que el 95 % de la variación presente en las 232 poblaciones estudiadas era explicada por tres componentes principales (CP): la altura de plantas, el largo de los tallos de las panículas, y el largo de la hoja bandera (Becerra, 2003).

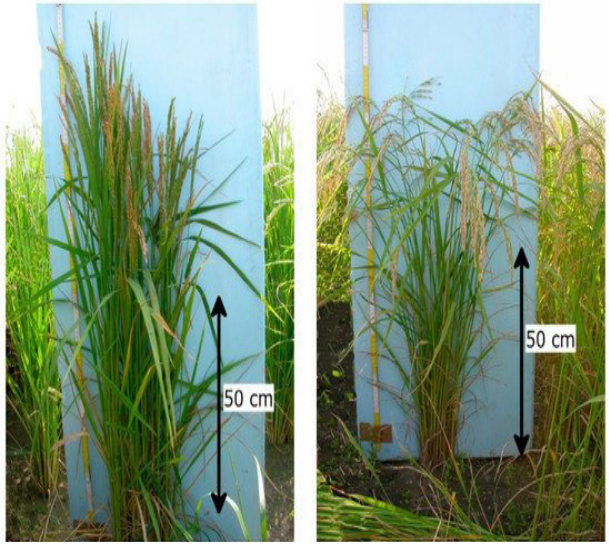
El arroz rojo es una planta similar al arroz comercial que dificulta su control, ya que madura más temprano y posee una mayor susceptibilidad al desgrane. Además, compite con el arroz comercial, disminuyendo el rendimiento del grano y aumentando los costos de producción. Produce rechazo de los semilleros infectados con esta maleza, reduce la calidad del grano y baja la calidad molinera, ya que el grano se quiebra con mayor facilidad, por lo que, finalmente, disminuye el valor comercial del arroz, por ser considerado un defecto (Alvarado et al., 2007).

En relación a su control, se ha informado de varios métodos, entre los cuales se pueden mencionar: uso de rotaciones de al menos cuatro años con pradera; uso de prácticas de manejo previo a la siembra (barbechos químicos); riegos de pre-siembra para favorecer la germinación y emergencia de las plántulas y la posterior eliminación de las plántulas emergidas a través del uso rastras o ´fangueo` superficial; limpieza de las máquinas cosechadora antes de iniciar la cosecha (Alvarado et al., 2007; Aravena, 2012); separación mecánica del arroz rojo del arroz comercial después de la cosecha mediante el uso de la luz, ya que el grano rojo es opaco y el grano comercial es transparente; uso de semilla certificada (Astorga, 1944; Alvarado et al., 2007); y producción de variedades resistentes a herbicidas que permitan proteger a la planta de arroz, pero controlar el arroz rojo, como por ejemplo, el uso de variedades Clearfield resistentes a las imidazolinonas (Paredes et al., 2019) o variedades Provisia resistentes a otros herbicidas graminicidas (www.agriculture.basf.us/crop-protection/products/provisia.html).

A pesar de la presencia del arroz rojo en las primeras siembras de arroz en el Chile, no se ha considerado como un problema de gran importancia (Sims y Alvarado, 1972; Alvarado y Hernaíz, 1995; Pedreros y Kramm, 2007; Henríquez et al., 2018), por lo cual existen pocos trabajos relacionados con esta maleza, siendo la mayoría de ellos prospectivos y descriptivos (Alvarado y Pedreros, 1991; Alvarado et al., 2007; Becerra, 2003; Aravena, 2012).

La primera prospección sobre la presencia del arroz rojo en Chile se realizó durante la temporada 1988-1989, en 13 siembras comerciales ubicadas entre las Regiones de O´Higgins y Biobío (Ñuble

desde 2018), en las variedades ´Diamante-INIA` y ´Oro`. El análisis de las muestras recolectadas señaló la presencia de plantas con grano rojo, con presencia de aristas de diferente tamaño y coloración y sin ellas, y diferentes coloraciones en los nudos de los tallos (Foto 13). Por otro lado, plantas de dos variedades presentaron presencia de granos rojos. El análisis de muestras de dos arroceras ubicadas en la Región de O´Higgins (Colchagua) y Biobío (San Carlos) indicó la presencia de arroz rojo en toda la zona arrocera del país y que el nivel de infestación varió entre un 0,02 % y un 4,1 %, y que la mayor frecuencia se presentó en las variedades de grano corto, como ´Oro` (Alvarado y Pedreros, 1991).



Fuente: Fogliatto et al., 2020.

Foto 13. Ejemplo de plantas de arroz rojo.

Una segunda prospección realizada en el año 2000, indicó que el nivel de contaminación del arroz rojo ya había alcanzado a las variedades de grano largo ancho, ya que en las muestras analizadas se pudo detectar granos con coloraciones rojas en los granos corto, medio y largo, y en los tipos redondeado, largo ancho y largo fino. Es importante resaltar que en esa temporada se presentó arroz grano rojo incluso en la variedad ´Brillante-INIA`, variedad que se sembraba por primera vez en el país. Esta situación confirma la capacidad de cruzamiento que posee el arroz rojo con el arroz comercial (Alvarado y Hernaíz, 2001; Alvarado et al., 2007).

Además de la contaminación con arroz rojo a nivel nacional de todas las variedades, la presencia de la maleza ha ido aumentando con el transcurso de los años. Es así como, el análisis de muestras cosechadas en los años 1989, 1996 y 2000, detectó un aumento desde un 39,2 % en 1989 a un 96 % en los granos cortos en el año 2000, mientras que, en el grano largo, el incremento pasó desde un 28,6 % en 1989 a un 72,4 % en 1996 y 2000, respectivamente (Alvarado et al., 2007). Al estudiar la distribución de los granos rojos en las diferentes áreas arroceras, se pudo detectar su presencia en todas las localidades estudiadas (Paredones, San Javier, Parral, Ñiquén y San Carlos). A pesar de esa situación, en el año 2000 un 88,2 % de las muestras analizadas cumplieron con la norma chilena, es decir, poseían menos de un 0,5 % de arroz con coloración roja (Alvarado et al., 2007).

Finalmente, en el año 2012 se realizó un análisis de 629 muestras pertenecientes a las Regiones de Maule y Biobío (Ñuble desde 2018). El análisis de la muestra indicó que estas regiones presentaron un 67,0 % y 75,1 % de las muestras con presencia de granos de arroz con color rojo, respectivamente. El mayor porcentaje de arroz rojo se observó en la Región del Biobío, lo que se podría explicar por el menor uso de semilla certificada (Aravena, 2012).

La distribución de la presencia de arroz rojo por comunas señaló que Linares, Longaví, Ñiquén, Parral, Retiro y San Carlos, presentaron un rango de 36 a 51 granos por muestra, a diferencia de la comuna de San Nicolás que presentó 137 granos rojos por muestra. Esta situación se podría deber a que esta comuna está conformada por pequeños agricultores arroceros que usan un bajo porcentaje de semillas certificadas. La comuna de Villa Alegre presentó el nivel más bajo promedio de infestación de arroz rojo en comparación con las demás comunas, lo que se podría deber al uso de transición en las siembras de arroz, lo que permite a los agricultores establecer rotaciones con distintas especies vegetales y, de esta manera, aminorar la infestación de esta maleza (Aravena, 2012).

Referencias

Alvarado, R., Hernaíz, S. 1995. Control de malezas. p. 45-52. En 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. 2001. Arroz. p. 611-625. En Agenda del Salitre. 11ª ed. Sociedad Química y Minera de Chile, Soquimich Comercial, Santiago, Chile.

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 N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S., Kramm, V. 2007. Arroz rojo, un problema actual. p. 127-136. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, manejo tecnológico. Boletín INIA N°162. p. 39-48. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Lobos, C. 1986. Calidad del arroz, caracterización de tres variedades y efecto de la fertilización nitrogenada y control de malezas. Agric. Téc. (Chile) 46:9-14.

Alvarado, R., Ormeño, J., Cisternas, C. 1985. Efecto de la fertilización nitrogenada y del control de malezas en el rendimiento del cultivo 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., Pedreros, A. 1992. Preparación de suelos en arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile). 52:32-35.

Anríquez, C. 1934. El cultivo del arroz y sus posibilidades en Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. 204 p. Universidad de Chile, Escuela de Agronomía, Santiago, Chile.

Araos, F., Rojas, C. 1976. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y azufre sobre los rendimientos de arroz. Agric. Téc. (Chile) 36:58-62.

Aravena, R. 2012. Situación actual de la infestación Con arroz rojo en arroz Diamante Comercial en la región del Maule y Bío-Bío. 20 p. Seminario de título Ingeniero de Ejecución Agrícola. Universidad Católica del Maule, Facultad de Ciencias Agrarias, Curicó, Chile.

Astorga, C.M. 1944. Elaboración industrial del arroz nacional. 129 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Agronomía. Santiago, Chile.

Becerra, A. 2003. Caracterización morfológica de biotipos de arroz rojo (*Oryza sativa*) presentes en Chile. 37 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía, Talca, Chile.

Beffa, R., Menne, H., Köcher, H. 2019. Herbicide Resistance Action Committee (HRAC): herbicide classification, resistance evolution, survey, and resistance mitigation activities. p. 5-32. In Jeschke, P., Witschel, M., Krämer, W., et al. (eds.) Modern crop protection compounds. 3rd ed. WileyVCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.

Bertín, P., Alvarado, R., Ormeño, J. 1984. La fertilización nitrogenada y el control de malezas en el cultivo del arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile) 22:6-10.

Binder, J. X., Pletscher-Frankild, S., Tsafou, K., et al. 2014. COMPARTMENTS: unification and visualization of protein subcellular localization evidence. Database (Oxford) doi:10.1093/database/bau012.

Bouhache, M. 1993. Photosynthetic response of flooded rice (*Oryza sativa*) and three *Echinochloa* species to changes in environmental factors. Weed Sci. 41:611-614.

Covshoff, S., Szecowka, M., Hughes, T., et al. 2016. C4 photosynthesis in the rice paddy: insights from the noxious weed *Echinochloa glabrescens*. Plant Physiol. 170:57-73.

Cruz-Hipólito, H., Osuna, M., Vidal, R., et al. 2009. Resistance mechanism to bensulfuron-methyl in biotypes of *Scirpus mucronatus* L. collected in Chilean rice fields. J. Agric. Food Chem. 57:4273-4278.

Délye, C., Jasieniuk, M., Le corre, V. 2013. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. Trends Genet. 29:649-658.

Elgueta, L. 1955. Organización de la cooperativa de productores de arroz de San Carlos. Simiente 25:80-81.

Figueroa, R., Gebauer, M., Fisher, A., et al. 2008. Resistance to bensulfuron-methyl in water plantain (*Alisma plantago-aquatica*) populations from Chilean paddy fields. Weed Technol. 22:602-608.

Fisher, A., Atech, C., Bayer, D., et al. 2000. Herbicide-resistant *Echinochloa oryzoides* and *E. phyllopogon* in California *Oryza sativa* fields. Weed Sci. 48:225-230.

Fisher, A., Granados, E., Trujillo, D. 1993. Propanil resistance in populations of jungle rice (*Echinochloa colona*) in Colombia rice fields. Weed Sci. 41:201-206.

Fogliatto, S., Ferrero, A., Vidotto, F. 2020. How can weedy rice stand against abiotic stresses? A Review. Agronomy 10:1284.

Gemién, R. 1946. El arroz en la zona central. Consideraciones acerca de su mejor cultivo y cosecha. Simiente (Chile) 16:136-138.

Gibson, K., Fisher, A. 2001. Relative growth and photosynthetic response of water-seeded rice and *Echinochloa oryzoides* (Ard.) Fritsch to shade. Int. J. Pest Manage. 47:305-309.

Grau, P., Cisternas, C. 1986. Nivelación en agua en campos de arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile) 28:7-12.

Grau, P., Cisternas, C., Mejía, O., et al. 1987. Plan nacional para el desarrollo de la producción de arroz en Chile. Proyecto Cooperativo INIA-CIAT, Santiago, Chile.

Heap, I. 2020. The international herbicide-resistant weed database. Disponible en: www.weedscience.org.

Henríquez, R., Henríquez, G., Sepúlveda, D., et al. 2018. Siembra. p. 52-58. En Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas de arroz en Chile. Serie Estudios para la Innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.

Hernaíz, S. 1986a. Control de malezas gramíneas en arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu 29:31-36.

Hernaíz, S. 1986b. Uso de MCPA en siembras de arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile) 30:19-21.

Hernaíz, S., Alvarado, R. 2007. Manejo del agua en el arrozal. p. 49-68. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, manejo tecnológico. Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hilton, H.W. 1957. Herbicide tolerant strains of weeds. Hawaiian Sugar Planters Association Annual Report, Honolulu, Hawaii.

Kogan, M., Araya, M., Alister, C. 2012. Water and sediment dynamics of penoxsulam and molinate in paddy fields: field and lysimiter studies. Pest Manage. Sci. 68:399-403.

Kogan, M., Gómez, P., Fisher, A., et al., 2011. Using penoxsulam ALS inhibitor as a brad-spectrum herbicide in Chilean rice. Cien. Inv. Agr. 38:83-93.

Koller, E. 2018. El cultivo de arroz en la Provincia de Ñuble y su terminología. Boletín de Filología 9:87-103.

Marticorena, C., Quezada, M. 1985. Catálogo de la flora vascular de Chile. Gayana Bot. 42:1-157.

Matthei, O. 1963. Manual ilustrado de malezas de la provincia de Ñuble. Universidad de Concepción, Escuela de Agronomía, Chillán, Chile.

Matzenbacher, F., Bortoly, E., Kalsing, A., et al. 2015. Distribution and analysis of the mechanisms of resistance of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) to imidazolinone and quinclorac herbicide. J. Agr. Sci. 153:1044-1058.

Olate, H. 1950. Industria del arroz en Chile y sus proyecciones económicas. 11:161-222. Memoria Licenciado, Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad de 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. Talleres Gráficos La Nación. Santiago, Chile.

Ormeño, J. 1981. Control de malezas en arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile) 5:3-6.

Ormeño, J. 1983a. Control de malezas en el cultivo del arroz. Análisis técnico económico del cultivo del arroz. p. 30-40. En Programa de Seminarios, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Ormeño, J. 1983b. Prospección de las principales malezas asociadas al cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). Agric. Téc (Chile) 43:285-287.

Ormeño, J. 1992. Efecto del hualcacho (*Echinochloa* spp.) sobre el rendimiento de arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile. Agric. Téc. (Chile) 52:208-213.

Ormeño, J., Grau, P. 1988. Las principales malezas de importancia económica en el cultivo del arroz en Chile. Bol. Agric. Shell (Chile) 48:6-11.

Ormeño, J., Reyes, G. 1989. Diferentes tipos de hualcacho (*Echinochloa*) asociados al cultivo de arroz en Chile. Simiente (Chile) 59:122 (Resumen).

Pardo, F., Cisternas, C. 1989. Consideraciones sobre el uso de herbicidas hormonales en el cultivo del arroz. Bol. Agric. Shell (Chile) 49:13-17.

Pardo, F., Cisternas, C. 1990. Londax en arroz: resultados de dos años de uso comercial. Bol. Agric. Shell (Chile) 50:5-7.

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), Chillán, Chile.

Pedreros, A., Alvarado, R. 1994. Efecto de la lámina de agua sobre el control de hualcacho (*Echinochloa crusgalli*) en el cultivo del arroz. Agric. Téc (Chile) 54: 112-117.

Pedreros, A., Kramm, V. 2007. Manejo de las malezas en el cultivo de arroz. p. 105-126. En Alvarado, R. (ed.) Arroz, Manejo Tecnológico. Boletín INIA N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Riar, D., Norsworthy, J., Srivastava, V., et al. 2013. Physiological and molecular basis of acetolactate synthase-inhibiting herbicide resistance in barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). J. Agric. Food. Chem. 61:278-289.

Rojas, C., Alvarado, R., Belmar, C. 1983. Fertilización nitrogenada en arroz. Efecto sobre algunos parámetros del cultivo. Agric. Téc. (Chile) 43:353-357.

Rojas, C., Belmar, C., Grau, P. 1991. Diagnóstico de deficiencias nutritivas en suelos bajo monocultivo de arroz. I. Efecto sobre el desarrollo vegetativo y reproductivo. Agric. Téc. (Chile) 51:328-333.

Rojas, C., Belmar, C., Grau, P. 1992. Diagnóstico de deficiencias nutritivas en suelos bajo monocultivo de arroz. II. Efecto sobre el rendimiento de grano y algunas variables agronómicas. Agric. Téc. (Chile) 52:181-186.

San Martín, J., Ramírez, C. 1983. Flora de malezas en arrozales de Chile Central. Cienc. Inv. Agr. 10:207-222.

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 N° 12: 3-6.

Sims, G. 1969. El cultivo del arroz. El Campesino (Chile) 100:43-71.

Sims, G. 1983. 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.

Sims, G., Alvarado, R. 1972. Control de malezas. p. 69-78. En Manual de producción de arroz. Boletín Técnico N°54. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Sotomayor, E. 1954. Ensayo comparativo de abonos en arroz. 50 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Switzer C. 1957. The existence of 2,4-D-resistant strains of wild carrot. Proc. Northeastern Weed Control Conf. 11:315-318.

Theune, H. 1941. Estudio taxonómico de "nuestra semilla nacional de arroz". 109 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad de Chile., Santiago, Chile.

Vallejos, C. 2018. Identificación y comparación de malezas presentes en paños para cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo siembra inundada y directa, en Unicavén, Parral. 68 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía, Talca, Chile.

Valverde, B. 2007. Status and management of grass-weed herbicide resistance in Latin America. Weed Technol. 21:310-323.

Villalobos, E. 1941. El cultivo del arroz y su importancia económica. 81p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Yasour, H., Tenbook, P., Tjeerdema, R., et al. 2008. Responses to clomazone and 5-ketoclomazone by *Echinochloa phyllopogon* resistant to multiple herbicides in Californian rice fields. Pest Manag. Sci. 64:1031-1039.

Capítulo 22. Visión mundial del uso del agua en el cultivo de arroz

Gonzalo Carracelas G., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V.,

Mario Paredes C., Hamil Uribe C.

En el mundo, el agua es un recurso cada vez más escaso, lo que se debe principalmente al cambio climático y competencia con otros sectores por su uso (Tuong y Bouman, 2003; Gaydon et al., 2010; Mekonnen y Hoekstra, 2016). A nivel mundial, el 96 % del arroz cultivado utiliza riego continuo de siembra a cosecha hasta 7 o10 d antes de la cosecha, requiriendo mucha más agua para su correcto desarrollo, en comparación con otros cereales (Pimentel et al., 2004; Tuong et al., 2005).

Los principales beneficios de la inundación continua en el cultivo de arroz están relacionados con el control más efectivo de las malezas (Marchesi y Chauhan, 2019), aumento en la disponibilidad de nutrientes (Dunn y Gaydon, 2011), menor incidencia de enfermedades (Cartwright y Lee, 2001) y protección contra el frío durante la etapa de microsporogénesis (Williams y Angus, 1994). La presencia de una lámina de agua en el cultivo de arroz cumple un rol muy importante en el control de malezas, sin afectar el crecimiento de arroz, ya que esta planta posee estructuras especializadas, denominadas aerénquimas, que le permiten sobrevivir en medio acuático (Nishiuchi et al., 2012).

El alto consumo de agua durante el cultivo del arroz hace necesario el desarrollo e implemento de nuevas técnicas de riego que sean más eficientes en el uso del agua, sin disminuir significativamente el rendimiento y la calidad de grano (Bouman et al., 2007a; Datta et al., 2017). Estas medidas de racionalización del uso del agua pueden ayudar también a lograr otros efectos positivos que se asocian, principalmente, a una menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Linquist et al., 2015; Tarlera et al., 2016) y a la menor absorción de algunos metales pesados, como el arsénico, entre otros (Linquist et al., 2015; Carrijo et al., 2018; Carracelas et al., 2019c).

Las principales dificultades agronómicas que genera la implementación de sistemas que utilizan una menor cantidad de agua son, un menor control de malezas, la aparición malezas diferentes a las habituales, problemas operativos de uniformidad del riego y pérdida de rendimientos de grano (Stevens et al., 2012; Datta et al., 2017). Para contrarrestar este problema, en U.S.A. se ha recomendado un mayor uso de herbicidas residuales y herbicidas para el control de malezas de hoja ancha.

Otro problema que se debe considerar en la reducción del uso del agua en este cultivo, es la etapa fenológica del cultivo más sensible al déficit hídrico, por su mayor impacto en el rendimiento. En este sentido, la falta de agua de riego durante el periodo reproductivo, disminuye la fertilidad de la espiga, reduciendo la producción de grano hasta en un 30 % (Garrity y O'Toole, 1994; Praba et al., 2009).

Consumo de agua en el cultivo del arroz

En general, el arroz es cultivado en condiciones de inundación continua (RKB, 2020), requiriendo cerca de 1.432 litros de agua para producir un kilogramo de arroz en condiciones de riego. El cultivo del arroz utiliza aproximadamente entre 34 a 43 % del total de agua para riego a nivel mundial, y alrededor de un 24 a 30 % de los recursos mundiales de agua dulce (FAO, 2018). Por ejemplo, en Asia se utilizan alrededor de 13.000 a 15.000 m^3 ha^{-1} para regar este cultivo.

Balance hídrico en el cultivo del arroz

El balance hídrico es el equilibrio entre los aportes de todos los recursos hídricos y las salidas de esos aportes del sistema (Kool et al., 2014). Los principales aportes son el riego (R, mm) y las precipitaciones (P, mm), mientras que las salidas corresponden a la evapotranspiración del cultivo (ETc, mm), escurrimiento superficial (E, mm), percolación profunda (Pe, mm) y el cambio en el almacenaje agua del suelo (ΔS, mm) (Bouman et al., 2007a; Grassi et al., 2009; Kool et al., 2014) (Figura 1).

Esto se puede describir de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P + R = E + Pe + \Delta S + ETc$$

Sin embargo, el cultivo de arroz presenta diferentes aportes y salidas del balance hídrico general, por lo que un arreglo a la ecuación anterior debe ser considerada (Bouman et al., 2007b; Herrera-Puebla et al., 2019).

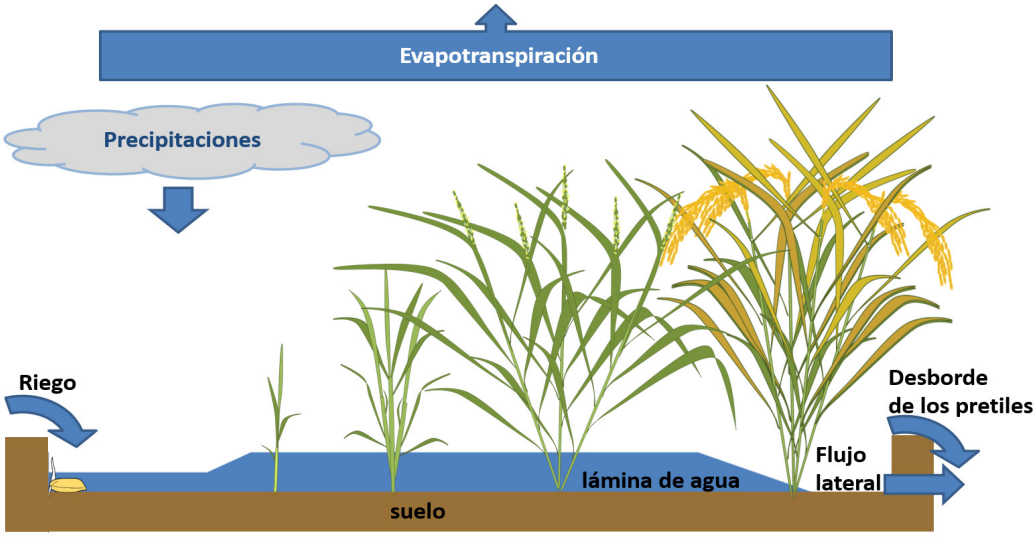


Figura 1. Balance hídrico en el cultivo del arroz (Adaptado: Bouman et al., 2007a).

El concepto de escurrimiento superficial debe ser reemplazado por desborde de los pretiles (O, mm) y flujo lateral (S, mm). Así, la nueva ecuación puede ser descrita como sigue:

$$P + R = (O + S) + Pe + \Delta S + ETc$$

Se estima que las salidas de agua, debido a la percolación durante la preparación de suelo para el cultivo del arroz, pueden ser de hasta 25 mm d^{-1} (Tuong et al., 1996). Otras estimaciones de percolación profunda en suelos pesados, realizadas durante el periodo de crecimiento de las plantas pueden alcanzar valores entre 1 a 5 mm d^{-1} y 25 a 30 mm d^{-1}, en suelo más arenosos (Datta et al., 2017). Estimaciones de evapotranspiración en algunos países de Asia alcanzan entre 4 a 7 mm d^{-1} y la evapotranspiración asociada a un óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo, puede fluctuar entre 4.000 a 7.000 m^3 ha^{-1} (Tabbal et al., 2002; Bouman et al., 2007b; Massey et al., 2014; Carracelas et al., 2019b).

Otras estimaciones de uso de agua en suelos arcillosos con napas poco profundas alcanzan a sólo 4.000 m^3 ha^{-1} de agua durante la temporada, comparados con los 20.000 m^3 ha^{-1} observados en suelos arenosos con napas profundas (Cabangon et al., 2004). En Uruguay, el agua de riego usada en sistemas tradicionales continuos, dependiendo de las condiciones edafo-topo-climáticas, va desde 11.000 a 14.000 m^3 ha^{-1}, con un valor promedio de 12.500 m^3 ha^{-1} (Battello et al., 2009). Estas informaciones concuerdan con datos obtenidos en Uruguay, donde se determinó un uso del agua de 13.300 m^3 ha^{-1}, con una evapotranspiración del cultivo cercana a un 45 %, es decir, 6.000 a 7.000 m^3 ha^{-1}, pérdidas asociadas al sistema de riego de 13 %, escurrimiento superficial y pérdidas laterales de 35 %, y percolación de 7 % del total de agua utilizada (Blanco et al., 1984). De toda el agua que ingresa al campo de arroz, la fracción que se pierde debido a la transpiración de la planta, es la única que incide directamente en el rendimiento en grano. El resto del agua utilizada tiene sólo la función de reponer el agua perdida por percolación profunda, escorrentía y evaporación.

Efectos del estrés hídrico en la planta de arroz

El cultivo de arroz es muy sensible al estrés hídrico, debido a su sistema radicular poco profundo (Tuong et al., 2005; Bouman et al., 2007b; Parent et al., 2010). El estrés hídrico en el período reproductivo, reduce el rendimiento a través de un menor número de espiguillas, peso de grano, mayor esterilidad y una disminución del número de granos llenos por panícula (Bouman y Tuong, 2001). Los efectos del estrés hídrico se hacen presentes en la planta de arroz cuando el suelo se encuentra bajo el punto de saturación. Frente a esta condición, la planta responde cerrando los estomas y disminuyendo la división celular, y la elongación de las células, lo cual tiene como consecuencia directa la reducción del crecimiento foliar y la tasa de transpiración y fotosíntesis (Bouman and Toung, 2001; Bouman et al., 2007b; Luo, 2010). Además, el estrés hídrico induce senescencia foliar, disminución de altura de la planta, número de macollas y enrollamiento de la hoja, lo que contribuye a reducir la captación de radiación solar, atrasando la floración e incrementando el crecimiento de las raíces en número y su profundidad de enraizamiento.

Productividad del agua

El concepto de productividad del agua es importante, debido a que, al optimizarse el uso del agua, se puede redestinar este recurso para sembrar una mayor superficie de arroz u otros cultivos, reducir el costo de riego y mano de obra, la huella del agua del cultivo, el impacto ambiental y abrir nuevas posibilidades de mercados para la exportación de arroz. La productividad de agua corresponde a la cantidad de kilogramos de arroz producidos por m^3 de agua utilizada. De acuerdo con Bouman et al. (2007b), existen diferentes formas de determinar la productividad del agua de acuerdo con el tipo de agua utilizada que incluye la productividad asociada a: agua transpirada (WP_T), agua de riego evapotranspirada (WP_{ET}), agua de riego (WP_R), agua de riego más precipitaciones (WP_{RP}) y la productividad total de agua (WP_{Tot}).

WP_T = (kg de arroz ha^{-1}) / (m^3 de agua transpirada)

WP_{ET} = (kg de arroz ha^{-1}) / (m^3 de agua evapotranspirada)

WP_R = (kg de arroz ha^{-1}) / (m^3 de agua de riego)

WP_{R+P} = (kg de arroz ha^{-1}) / (m^3 de agua de riego + m^3 agua precipitaciones)

WP_{Tot} = (kg de arroz ha^{-1}) / (m^3 de agua de riego + m^3 agua precipitaciones + agua capilar)

La productividad del agua se puede mejorar a través de: a) sistemas de riego con déficit controlado (lámina variable-intermitente), sistematización del riego en el campo, reducción del periodo

de riego – inundación – retiro del agua, uso de mangas o politubos, construcción de taipas o pretiles con anticipación, realización de las labores del campo con anticipación (verano), reducción de las pérdidas por escurrimiento superficial y percolación; b) uso de variedades de ciclo corto o que posean una estructura que le permita utilizar de mejor forma el agua disponible; c) mejoramiento y sistematización de los sistemas de conducción de agua hacia el campo.

Sistemas de riego en el cultivo de arroz en el mundo

El uso del agua en el cultivo del arroz depende del sistema productivo en el cual se desarrolla la planta (Boumann et al., 2007a; Seck et al., 2012). A nivel mundial se han reportado distintas formas de producir arroz: 1) arroz de riego, el cual representa cerca del 75 % de la producción mundial de arroz, con medias de rendimiento de 5,4 t ha^{-1}; 2) arroz de secano de tierras bajas, el cual corresponde a un 56 % de la producción de Asia con rendimientos de 1,0 a 2,5 t ha^{-1}; 3) arroz de secano de tierras altas que representa alrededor del 1 % de la producción de Asia con rendimientos cercanos a 1,0 t ha^{-1}; y 4) arroz flotante, el cual crece bajo inundación de un metro de agua y corresponde a variedades especialmente adaptadas para esas condiciones. Dentro de este contexto, diferentes países han implementado diversas estrategias de manejo de riego, con el fin de mejorar la productividad del agua y sostener o aumentar el nivel de producción del cultivo, utilizando una menor cantidad de agua.

Experiencia y recomendaciones de manejo del riego y uso del agua a nivel global

El Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) ha desarrollado diversas prácticas de manejo y recomendaciones que permiten aumentar la productividad del agua en el cultivo de arroz (RKB, 2020). Para asegurar rendimientos máximos y un uso efectivo y eficiente del agua, recomiendan el uso de algunas prácticas agronómicas como: a) contar con canales de avance dentro del campo que permitan controlar la entrada del agua en varios sectores a la vez. Esta situación favorece la velocidad de llenado de los cuadros y las labores de control de malezas; b) preparar el suelo con el objetivo de minimizar las pérdidas de agua, evitando romper el pie de arado ubicado bajo el suelo utilizable, ya que se pueden producir grandes pérdidas de agua producto de la presencia de grietas bajo la zona donde están las raíces; c) preparar el suelo seco, ya que permite un importante ahorro de agua. La preparación de suelo húmedo puede llegar a consumir hasta un tercio del total de agua requerida para el crecimiento del arroz, en un sistema de arroz irrigado. En el caso de la preparación de suelo húmedo, puede que sea necesario incluir un segundo rastraje que se debería realizar manteniendo el agua en el campo para definir las áreas altas y bajas, preocupándose de la construcción de pretiles y/o taipas, reparando fracturas y orificios; d) revisar la nivelación, ya que un suelo mal nivelado requiere entre 80 a 100 mm más de agua, lo que equivale a un 10 % del total utilizado en el cultivo; e) considerar una altura de agua de 3 cm al momento del trasplante, debiendo incrementarse entre 5 y 10 cm en la medida que el cultivo aumenta su altura; f) realizar la inundación una vez que las plantas tienen 3 a 4 hojas, en el caso de realizar siembra directa; y g) mantener un nivel del agua de al menos 5 cm entre la excersión de la panícula y la floración, ya que la planta de arroz es muy sensible a la falta de agua (bajo saturación) en la etapa de floración, lo que se puede traducir en considerables pérdidas en el rendimiento por un aumento en la esterilidad floral.

En el caso que el agricultor no tenga una buena disponibilidad de agua en su predio, una manera de enfrentarlo podría ser la utilización de métodos de riego intermitente (Alternating wetting and drying; AWD), combinado con el sistema de siembra directa. Este sistema permite que el nivel del agua llegue hasta 15 cm bajo la superficie del suelo lo cual se puede medir mediante un piezómetro. Una vez que esto sucede se re-inunda a una profundidad de entre 5 a 10 cm sobre el nivel del suelo, para, posteriormente, permitir que el nivel del agua disminuya entre 5 hasta 15 cm bajo el nivel del suelo. Este procedimiento se puede repetir hasta antes de la floración.

En el caso de aparición de muchas malezas, se puede suprimir el sistema por dos a tres semanas para utilizar un control químico. En el caso de la siembra directa, el sistema AWD se puede aplicar desde la aparición de la tercera y cuarta hoja.

China

China es el mayor productor de arroz en el mundo, con un 28 % de la producción global (FAO, 2018). El cultivo del arroz en China se desarrolla en tres fechas diferentes: temprano desde abril, media que corresponde a mayo y tardía en julio. La principal forma de establecimiento del cultivo en China es a través de trasplante manual y mecánico (Nie y Peng, 2017). Sin embargo, el sistema de siembra directa ha aumentado en superficie, debido a que disminuye el uso de agua, labores y personal. Existe una gran variedad de sistemas productivos y climas (sub-tropical cálidos a templados). En China más del 90 % de la superficie de este cultivo se realiza bajo riego. La cantidad media de agua de riego utilizada por agricultores arroceros de China oscila entre 1.026 mm (zona norte) y 736 mm (zona sur) (He et al., 2020). La agricultura en China es intensiva con baja disponibilidad hídrica y depende en gran parte del riego. Por ello, se han implementado soluciones relacionadas con la mejora en el uso del agua a través del riego intermitente, debido a la disminución del recurso hídrico por competencia con otros usos. China es pionero en la implementación de políticas asociadas a un menor uso de agua y en investigaciones de riego intermitente. La investigación de técnicas asociadas al ahorro de agua comenzó en 1985 (Li y Barker, 2004). Como resultado se ha determinado que se puede ahorrar agua en el cultivo del arroz sin disminuir los rendimientos, manteniendo un contenido de agua en el suelo a nivel radicular, entre un 70 % y 80 % de contenido de humedad saturada. El año 2002, cerca del 40% de la producción de arroz de China (12 millones ha) fueron regadas mediante riego intermitente, con un incremento en los rendimientos que van desde 5 % a un 25%.

India

En la India se estima que el área regada para el cultivo del arroz es de 25,1 millones ha. Dentro de los métodos de siembra utilizados en India están el trasplante, siembra al voleo y siembra directa. En India, la cantidad de agua necesaria para producir arroz es de entre 15.660 y 22.620 $m^3\ ha^{-1}$. Para intentar reducir esta cantidad, el uso de técnicas como el riego intermitente y el sistema de intensificación de arroz (SRI) han sido explorados. Además, han experimentado la micro-irrigación, con un ahorro de agua en torno al 40 % y 42 % respecto del sistema tradicional (Govindan y Grace, 2012; Vanitha y Mohandass, 2014). Específicamente, con el uso de riego sub-superficial, han obtenido rendimientos de 7,1 t ha^{-1} con una productividad de agua de 0,9 kg m^{-3} en contraste con las 3,1 t ha^{-1} en el riego tradicional, con una productividad de agua de 0,2 kg m^{-3} (Rao et al., 2017).

Colombia

El arroz en Colombia se cultiva principalmente a través de riego y también en condiciones de secano. En este país el sistema de siembra es principalmente mecanizado (70 %) o manual (tradicional) (GRiSP, 2013). En el caso de Colombia, la agricultura ocupa aproximadamente el 54 % del agua y de ese porcentaje un 22 % (4.185.000 m^3) es utilizado por el cultivo del arroz (Becerra et al., 2019; González et al., 2014). La alta demanda de agua en la agricultura colombiana se debe, fundamentalmente, al manejo agronómico del cultivo y al uso del riego gravitacional. Por otro lado, la falta de este recurso en la región, se debe principalmente a la variabilidad climática asociada al cambio climático global y a la degradación de cuencas en distritos de riego. El sistema de adopción masiva de tecnología (AMTEC) (Fedearroz, 2012) ha promovido un uso racional del agua, lo que ha permitido generar una disminución de entre 15 % y 39 % en la huella del agua, en com-

paración con el sistema tradicional (MADR y CIAT, 2015). El porcentaje de adopción de esta tecnología por área sembrada es de 15 % en el Bajo Cauca, 40 % en la Zona Centro, 25 % en la Costa Norte, 15 % en la Zona de los Llanos y 5 % en Santander (DANE-Fedearroz, 2017).

Australia

El arroz en Australia depende completamente del riego (RGA, 2020). El cultivo es regulado por Murrumbidgee Irrigation Limited, Murray Irrigation Limited and Coleambally Irrigation Cooperative Limited, y se autoriza solamente en suelos con baja infiltración. En este país se han registrado gastos de agua de riego de 12.000 a 15.000 m^3 ha^{-1}, con valores de productividad muy altos, debido a los buenos rendimientos logrados, donde los mejores productores obtienen 14 a 15 t ha^{-1}, con las mejoras en la eficiencia del uso del agua, el uso de variedades precoces de alto potencial de rendimiento y buenas prácticas de manejo.

El 80 % del arroz que produce Australia es de grano medio tipo *japonica*, de variedades de tamaño largo ancho como ´Amaroo`, ´Millin` y ´Langi` y variedades de tamaño corto como ´Koshihikari` que se destina al mercado japonés. Para mejorar el uso del agua, los agricultores australianos han seguido estrictamente las regulaciones asociadas al crecimiento del cultivo del arroz, planificación predial, geo-nivelación del suelo con pendiente controlada que facilitan el riego y drenaje, variedades de ciclo corto, uso de otros cultivos que utilicen la humedad de suelo posterior a la cosecha, retraso del momento de inundación permanente del cultivo, grupos de trabajo para discutir el uso de nuevas tecnologías y mantener las buenas prácticas, y la planificación de manejo de suelo y el agua. Asociado a estas medidas, existen sistemas de detección de áreas con baja permeabilidad que permite generar políticas de nuevo uso de suelo y así limitar el cultivo sólo a zonas de baja infiltración de agua (Beecher et al., 2002; Humphreys y Robinson, 2004).

Proyecciones negativas basadas en un escenario A1 (IPCC, 2000), indican una reducción del caudal en la cuenca Murray-Darling, de hasta un 48 % para el año 2100 (Beare y Heaney, 2002), lo que ha llevado a desarrollar tecnologías que permiten mantener los niveles de producción, disminuyendo la cantidad de agua utilizada (Gaydon et al., 2010). Una de las mejoras realizadas, se relaciona con la disminución del tiempo en que el cultivo está inundado. El periodo ideal para implementar esta tecnología es, desde que la planta tiene tres hojas hasta cuando ésta cubre completamente la canopia.

Otras tecnologías alternativas utilizadas han sido el riego intermitente, el uso del suelo saturado, uso del arroz aeróbico y el riego por aspersión, como una manera de disminuir el uso del agua (Muirhead, 1989; Humphreys et al., 2005; Kato et al., 2009). Sin embargo, una de las principales restricciones en el uso de estas tecnologías ha sido el incremento de los costos en riego, fertilidad y control de malezas.

Durante la etapa reproductiva se recomienda mantener el cultivo con una lámina de agua de 20 a 25 cm (Humphreys et al., 2005), debido al elevado potencial de evapotranspiración del cultivo en este periodo y a la necesidad de proteger la planta frente a las bajas temperaturas presentes en Australia. Experiencias de riego basadas en la evapotranspiración de referencia, hasta el inicio de formación de panícula, han generado ahorros de uso de agua entre un 15 % y un 22 %, con una disminución del rendimiento cercano a 10 % (Dunn y Gaydon, 2011). Sin embargo, el uso de estas tecnologías necesita la realización de siembras más tempranas, para asegurar que el desarrollo de la microspora temprana ocurra en periodos con menor probabilidad de bajas temperaturas.

Actualmente se están desarrollando diversos proyectos relacionados con la automatización del riego, uso de sensores que monitorean las condiciones meteorológicas, el suelo, el agua, la planta y que permiten determinar las necesidades del cultivo.

Estados Unidos (U.S.A.)

En U.S.A. el arroz se cultiva principalmente mediante siembra directa y siembra con arroz pregerminado, con la totalidad de la superficie manejada bajo riego.

Con el fin de tecnificar el riego del arroz en U.S.A., se ha utilizado el sistema de riego con múltiples entradas (MIRI – Multiple Inlet Rice Irrigation) que permite que el agua ingrese a todos los cuadros simultáneamente, con mangas de riego instaladas perpendicularmente a las taipas (Massey et al., 2014). El uso de las taipas rectas permite un ahorro de agua del 17 % (9.650 m^3 ha^{-1}), mientras que el sistema MIRI usado con taipas rectas redujo el uso de agua de riego en un 30 % (7.830 m^3 ha^{-1}). También se ha observado que la nivelación a cota cero permite un ahorro importante de agua, con una reducción en su uso por temporada de aproximadamente 55 %, en relación con los campos sistematizados con taipas siguiendo las curvas de nivel (Smith et al., 2007).

Otras experiencias realizadas para mejorar el uso del agua en el cultivo, son el riego por surcos en siembra directa, facilitando la infiltración del agua a través de los surcos (Stevens et al., 2018). Para establecer este sistema, se construyen surcos antes de la siembra, siguiendo la pendiente del campo. El espaciamiento de los surcos debe ser de aproximadamente 76 cm, dependiendo de las propiedades del suelo, y el arroz debe sembrarse a una distancia de 19 cm entre hileras. Este sistema de manejo agronómico muestra una reducción en el rendimiento entre 11 % y 48 %, en comparación con el sistema completamente inundado. Los rendimientos en grano, utilizando este sistema de riego, fluctúan entre 6,1 y 11 t ha^{-1}, dependiendo de la variedad de arroz utilizada. Para poder realizar este riego se utilizan mangas de riego de 30 cm de diámetro, las cuales pueden transportar cerca de 3.785 L m^{-1}. La manga es perforada en base a información de software PHAUCET desarrollado por USDA (Natural Resources Conservation Service). Debido a que la presión es difícil de mantener en sectores amplios, las mangas se dividen en secciones donde las compuertas se abren o cierran dependiendo del tiempo necesario para el riego. Este sistema se puede automatizar a través del uso de una válvula de riego por pulsos, que permite riegos con diferentes frecuencias.

En este sistema el monitoreo de la evapotranspiración del cultivo es fundamental para programar el riego y no generar problemas de estrés en las plantas. Este monitoreo se puede realizar mediante programas computacionales comunicados con estaciones meteorológicas. En este sentido, la Universidad de Missouri desarrolló el software ´Crop Water Use` que permite regular la frecuencia de riego. Finalmente, el uso de mangas de riego es un sistema eficiente, de fácil implementación que, a escala comercial, puede incrementar los rendimientos y restablecer la lámina de agua, con mayor velocidad que los sistemas convencionales.

Uruguay

Actualmente, en Uruguay el área cultivada de arroz se extiende a unas 145.000 ha que producen 1,2 millones de toneladas, de las cuales más del 90 % es exportado (DIEA MGAP, 2019). El arroz en Uruguay se cultiva en tres zonas principalmente: norte, centro y este.

En la zona norte se cultiva el 20 % del total del área arrocera, la cual corresponde a la cuenca del río Cuareim y del río Uruguay. En esta zona las pendientes son más pronunciadas y el mayor porcentaje del agua de riego proviene de represas. En la zona centro, el área cultivada alcanza el 9 % y corresponde a la que se ubica en la cuenca de río Negro y requiere de represas para el abastecimiento. Finalmente, la zona este es la de mayor superficie sembrada (71 %) y abarca las planicies de la Laguna Merín y del Atlántico. La topografía en general es muy plana y cuenta con abundantes fuentes de agua (DIEA MGAP, 2019). El laboreo, nivelación, sistematización, siembra, primer herbicida y primera fertilización de nitrógeno, se realizan sobre suelo seco.

La totalidad del área cultivada en Uruguay es regada. El 45 % del riego se realiza con bombeo eléctrico y un 45 % es por gravedad (DIEA MGAP, 2019). Las represas construidas con fines de riego son la principal fuente de agua. El riego gravitacional es responsable de 80.000 ha y la electricidad de

cerca de 65.000 ha. El riego con diésel no es viable desde el punto de vista económico (DIEA MGAP, 2019). El sector arrocero uruguayo se caracteriza por tener una muy buena integración con la cadena agroindustrial, entre las distintas instituciones vinculadas al sector: Asociación de Cultivadores (ACA), Gremial de Molinos Arroceros (GMA), Investigación (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - INIA) y Gobierno (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - MGAP). Esta integración ha favorecido la transferencia de tecnologías disponibles para el cultivo.

Los rendimientos en Uruguay han aumentado a una de las tasas más altas a nivel mundial (14 t ha^{-1} $año^{-1}$ entre 2000 y 2017) (Carracelas et al., 2017a). Los niveles de rendimiento actuales en Uruguay se encuentran sobre las 8,3 t ha^{-1}, lo que representa el 57 % del potencial de rendimiento estimado (14 t ha^{-1}), e indica que es posible aumentar aún más los rendimientos y continuar reduciendo las brechas que alcanzan a 3,1 t ha^{-1} (Carracelas et al., 2019a). La tasa de aumento de los rendimientos de arroz en Uruguay se explica, principalmente, por la alta adopción tecnológica, la incorporación de nuevas variedades y la implementación de prácticas integradas de manejo de cultivos. El manejo del riego juega un rol fundamental en permitir el logro del potencial productivo de las variedades disponibles a nivel comercial. El riego de inundación temprana y su alta uniformidad han sido los manejos claves para el logro de los altos rendimientos en el cultivo de arroz. La sistematización a un menor intervalo vertical, sistema de múltiples taipas, cambio de la forma de la taipa, disminución de la altura de la taipa, uso de mangas de riego y canales secundarios, regueras con pendiente controlada plantadas con arroz, han facilitado la velocidad y uniformidad del riego y del cultivo.

La inundación se realiza a partir del estado fenológico V3 (15 a 35 d después de la emergencia) (Counce et al., 2000). La finalización del riego es entre 10 y 20 d previo a la cosecha, lo cual se realiza sobre suelo seco. Las ventajas de cosecha en suelo seco implican un menor costo por menor desgaste de maquinaria, menor gasto de combustible y mantención de la estructura del suelo y sistematización para los próximos cultivos.

Otros cambios tecnológicos registrados en los últimos años son: siembra de variedades de alto rendimiento resistentes a enfermedades, alto uso de semilla certificada, sistematización, nivelación, laboreo de verano, reducción de laboreo, mayor proporción del área sembrada en periodo óptimo (octubre), manejo eficiente de fertilización nitrogenada, uso eficiente de fungicidas, y control de malezas temprano con menores dosis. Todo esto ha logrado una mayor eficiencia y un menor impacto ambiental.

Finalmente, la incorporación de otros cultivos como soja y la integración con ganadería ha contribuido, favorablemente, en el logro de altos rendimientos y en la sustentabilidad del sector. La rotación típica en los sistemas arroceros en Uruguay es de dos años de arroz seguido por la siembra de pasturas perennes (3 años). Nuevas rotaciones han incluido la siembra de otros cultivos como soja, los cuales han tenido un impacto favorable en los rendimientos logrados durante el cultivo de arroz.

Chile

En Chile, el sistema de siembra mayoritariamente utilizado es el inundado con uso de semilla pregerminada. La semilla pregerminada es distribuida al voleo sobre una lámina de agua de 5 cm. Esta labor se realiza manualmente (sobre animales de carga), por avión o a través de un trompo de aplicación de fertilizantes. La dosis de semilla utilizada fluctúa entre 140 y 200 kg ha^{-1} en siembra manual y 120 kg ha^{-1} en siembra por avión.

Con posterioridad a la siembra, el cultivo requiere un incremento de la lámina de agua superior a 10 cm en etapa de plántula (V3 a V4), hasta la madurez fisiológica. Datos preliminares muestran que este sistema de siembra requiere sobre los 18.000 m^3 ha^{-1} durante la temporada, la que se extiende por unos 160 d, entre octubre y marzo (Quezada et al., 2011; Henríquez et al., 2018; Donoso et al., 2019).

El otro sistema de siembra utilizado es la siembra directa, la cual permite ahorrar agua, principalmente, durante la etapa vegetativa de la planta, mejorando la eficiencia del proceso de la siem-

bra, fertilización y aplicación de herbicidas (Henríquez et al., 2018). Este sistema de siembra ha ido aumentando y, en la actualidad, cubre aproximadamente un 20 % del cultivo del arroz (Paredes et al., 2015; Henríquez et al., 2018). Este sistema requiere de una preparación de suelo a cota cero o micronivelación láser (Henríquez et al., 2018), buena preparación de suelo y siembra realizada con máquina sembradora de cereales, ubicando las semillas a tres centímetros de profundidad. La dosis de semilla fluctúa entre 100 y 120 kg ha^{-1}. Este sistema sólo requiere mantener la humedad del suelo para iniciar la germinación de la semilla hasta V3-V4, para luego inundar con una lámina de agua de 5 a 10 cm, hasta la madurez fisiológica (Henríquez et al., 2018). Según estudios realizados en Chile, la siembra directa permite ahorrar alrededor de un 20 % en el agua de riego, en comparación con la siembra con arroz pregerminado en suelo inundado (Henríquez et al., 2018). Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías de riego y la cuantificación de agua utilizada por el cultivo, continúan siendo problemas por resolver en el país. En la actualidad, diversos proyectos de investigación relacionados con el mejor uso del agua en el cultivo, intentan encontrar las mejores alternativas tecnológicas que permitan resolver esta problemática (Donoso et al., 2019).

Manejos alternativos de riego en el cultivo del arroz

Existen diversas prácticas de manejo de riego y tecnologías que permiten mejorar la eficiencia del riego en el cultivo del arroz. Algunas de ellas ya están siendo utilizadas en algunos países y permiten mejorar la productividad del agua, ahorrando un volumen importante del recurso hídrico y mejorando su distribución en el campo. Estas tecnologías se describen a continuación.

Riego intermitente

En el manejo intermitente del riego, el suelo siempre se mantiene en condiciones de saturación, nunca se seca. Lo que varía es la altura de la lámina de agua, hasta llegar a una situación de ´barro líquido`. Diversos autores señalan que la reducción en el uso de agua al implementar manejos alternativos de riego como el intermitente, estaban asociadas con un aumento en la captura de agua de lluvia (Massey et al., 2014; de Avila et al., 2015, Massey et al., 2018).

El riego intermitente combinado con un sistema de riego de arroz de entrada múltiple mediante el uso de mangas (MIRI) en U.S.A., permitió una reducción importante en el agua utilizada (4.990 m^3 ha^{-1}) y determinó un efecto positivo en el rendimiento de grano en relación con las inundaciones continuas (Massey et al., 2014). La clave de éxito de estos manejos en los predios comerciales radica en contar con un sistema de riego confiable, con amplia capacidad de suministro de agua de riego que permita una rápida y uniforme re-inundación del campo, asegurando que el estrés hídrico no limite la producción del cultivo. La experiencia en el uso de los sistemas de múltiple entrada (MIRI), asociados a un programa de manejo integrado del cultivo (malezas, fertilización y enfermedades), son fundamentales para adaptar e implementar el riego intermitente en cultivos comerciales.

Estudios de investigación realizados en Uruguay, donde se evaluaron diferentes manejos de riego como la inundación continua temprana (C), el riego restringido con secados hasta primordio (AWD), inundación intermitente hasta primordio (IP) e inundación intermitente durante todo el período de crecimiento del cultivo (I), permitieron señalar que el riego intermitente (IP, I) registró ahorros significativos en el gasto de agua en las regiones norte y centro (en promedio 35 % o 3.986 m^3 ha^{-1}) en relación con el manejo tradicional. La productividad del agua, considerando el agua de riego, solamente se incrementó en un 23 % en IP y 62 % en I, en relación con el control (C). El porcentaje de granos enteros se redujo significativamente en el tratamiento de riego intermitente (I) en la región norte. Las técnicas que mantuvieron el suelo en condiciones saturadas (inundaciones intermitentes), permitieron una reducción del gasto de agua sin efectos significativos en el rendimiento de grano, lo que condujo a un aumento importante en la productividad del

agua de riego. La técnica de riego intermitente hasta el inicio de primordio permitió un ahorro considerable del gasto de agua y un aumento significativo en la productividad del agua de riego, sin afectar el rendimiento de arroz y la calidad industrial del grano (Carracelas et al., 2019b).

El riego intermitente, al mejorar significativamente la productividad del agua en el cultivo del arroz en Uruguay, se convierte en una excelente alternativa frente a fenómenos de escasez hídrica. Aumentar los rendimientos y mantener la calidad industrial del grano de arroz, mientras se reduce el gasto de agua, podría determinar una mejora en el resultado económico de la actividad por un ahorro en los costos asociados al riego (mano de obra, costos de bombeo). Es importante considerar que el ahorro de agua se justifica cuando su aplicación permite obtener al menos rendimientos similares o superiores a los sistemas convencionales de riego y si está asociado a un ahorro en los costos asociados al riego. Otra consideración es contar con sistemas de medición de agua que permitan realizar una cuantificación efectiva del riego, para promover sistemas de riego más eficientes.

Riego de periodos alternados de suelo saturado e insaturado (AWD)

Esta técnica de manejo de riego consiste en alternar las condiciones del suelo de saturado a insaturado, modificando los intervalos de riego, permitiendo que la lámina de agua baje del nivel del suelo hasta que el suelo alcance un estado aeróbico, antes de que el campo se vuelva a inundar.

Este tipo de manejo puede estar asociado a diferentes niveles de estrés hídrico para las plantas de arroz asociado al nivel de secado, duración y momento fenológico en el que se realiza. El AWD es una tecnología ampliamente usada en diversos países asiáticos como en el caso de Filipinas. Estudios realizados en estos países han determinado ahorros importantes en el gasto de agua de riego (15 % a 30 %), sin afectar negativamente el rendimiento de arroz en relación con el riego continuo tradicional (Lampayan et al., 2003; 2005). La técnica conocida como ´safe AWD` permite una reducción importante en el agua utilizada, sin penalizar el rendimiento del grano de arroz. Esta técnica consiste en dejar que la lámina de agua disminuya a una profundidad de hasta 15 cm por debajo de la superficie del suelo, de manera que las raíces aún tengan acceso al agua. Luego, el campo se vuelve a inundar con una lámina de agua de 5 cm (Lampayan et al., 2015; Carrijo et al., 2018), sin afectar el rendimiento cuando el potencial de agua del suelo fue mayor a - 20 kPa (Carrijo et al., 2017).

Otros estudios realizados a nivel mundial reportaron una pérdida importante en el rendimiento con este manejo de riego (AWD) en relación con el riego tradicional, presentándose una gran variabilidad en su impacto, dependiendo del tipo de suelo y de los diferentes niveles de estrés hídricos establecidos (Bouman y Tuong, 2001). Resultados obtenidos en Uruguay con el manejo AWD, donde el periodo de secado se realizó durante la etapa vegetativa, permitiendo un agotamiento del 50 % del agua disponible a nivel del suelo, estuvieron asociados a una reducción en el rendimiento cercana al 15 % en relación con el riego continuo tradicional (Carracelas et al., 2019a; 2019b). El riego restringido AWD permitió un 29 % (- 2.067 m^3 ha^{-1}) de ahorro en agua de riego, en relación con el riego tradicional continuo, pero determinó una pérdida de rendimiento significativa de alrededor de un 15 %, equivalente a 1.339 kg de arroz ha^{-1} (Carracelas et al., 2019a). Cuando el suelo se seca, aún en la etapa vegetativa, el rendimiento se afecta negativamente. Sin embargo, esta técnica puede reducir la acumulación de arsénico inorgánico en el grano de arroz en ciertos tipos de suelos (Carrijo et al., 2018; Carracelas et al., 2019c).

Sistema de intensificación del cultivo arrocero (SRI: System of rice intensification)

El sistema de intensificación del cultivo arrocero (SRI; De Laulanie, 1993), es una metodología agroecológica para el incremento de la productividad del arroz y otros cultivos. Se basa en un fácil y rápido establecimiento de plantas mediante trasplante, una reducida densidad de plantas, enriquecimiento del suelo a través del uso de materia orgánica y una reducción y control en el uso del

agua. Según los resultados obtenidos en los países donde se ha implementado esta metodología, se ha logrado incrementar el índice de área foliar y el peso seco de las plantas (Lin et al., 2011), disminuyendo la cantidad de agua (Choi et al., 2013) y el uso de fertilizantes sintéticos, menor dosis de semilla (Ferichani y Prasetya 2011) y un aumento de los rendimientos (Ferichani y Prasetya, 2011; Rao, 2011). En general, se considera que esta tecnología puede beneficiar a pequeños agricultores de bajos ingresos que cultivan el arroz para autoconsumo (Ramesh et al., 2019).

Tecnologías disponibles que facilitan la implementación de manejos alternativos de riego

Existen diferentes tecnologías de riego disponibles a nivel global para implementar las técnicas de riego alternativas al sistema tradicional. Estas tecnologías permiten la re-inundación rápida de campos de arroz nivelados uniformemente, lo que posibilitan la permanente saturación del suelo y con niveles de humedad disponibles para que no afecten el rendimiento del cultivo de arroz. Dentro de estás tecnologías se destaca el riego por mangas y el riego automatizado por telemetría.

Riego por mangas o politubos

El riego por mangas es una tecnología ampliamente utilizada en U.S.A., Argentina y Uruguay, que permite mejorar la eficiencia del uso del agua.

Las principales ventajas se asocian a una reducción de pérdidas por evaporación directa como ocurre en los canales de avance, la cuantificación del uso del agua y un incremento en el número de hectáreas regadas por persona (~120 ha) (Bandeira y Böcking, 2014). En estos casos, las mangas se colocan a una distancia de 200 m unas de otras y las compuertas cada 50 m. El uso de mangas de riego permite un ahorro de agua en el riego cercano al 13 % (1.900 m^3 ha^{-1}), lográndose incrementos en el rendimiento cercanos a 1.000 kg arroz ha^{-1}. El uso de mangas facilita la implementación de manejos de riego alternativos, como el riego intermitente, riego por surcos, y de entradas múltiples de agua (MIRI), con reducciones importantes de agua de riego y aumentos de rendimientos en grano en relación con las inundaciones continuas (Massey et al., 2014).

El uso de mangas de riego en campos comerciales permite una mayor velocidad de inundación y uniformidad del riego, lo cual facilita la implementación de manejos alternativos (Carracelas et al., 2017a). Otras ventajas identificadas por productores que usan esta tecnología en Uruguay es el posible uso de personal no calificado, menores problemas de erosión, mejor control del agua y una mayor eficiencia en el uso del agua.

Riego automatizado por telemetría

La implementación de sistemas de riego automatizados permite asegurar un uso racional del recurso hídrico y medir el volumen de agua, elementos esenciales para hacer un uso más eficiente del agua. Sin embargo, la automatización tiene un alto costo, lo cual impide un uso masivo de estas tecnologías (Niblack y Sánchez, 2008; Dassanayake et al., 2009; Shahidian y Serralheiro, 2012).

Existen sistemas automatizados, como los creados en Australia, FarmConnect® (Rubicon Water, 2020) y Aquator (G&M Poly, 2018). FarmConnect® es un sistema integrado y más accesible que permite controlar compuertas y válvulas de riego, en base a la información de sensores y medidores que monitorean el nivel del agua y los contenidos de humedad del suelo, y son capaces de medir el flujo del agua superficial. Este sistema posee, además, una interfaz web que permite revisar en tiempo real el sistema de riego, notificar de posibles problemas en el riego y almacenar la información actual e histórica del riego.

Ensayos preliminares de Koech et al. (2014) demostraron que estos sistemas son efectivos para mejorar la eficiencia en el uso del agua (Smith et al., 2016). Este sistema se ha adoptado masivamente en el sur de Australia y en California (Gillies et al., 2010). Algunos autores han reportado eficiencias de aplicación de agua de hasta un 90 % (Smith et al., 2016). Por ejemplo, en el caso del riego por surcos en Australia, (Raine y Bakker, 1996; Smith et al., 2005) encontraron eficiencias de aplicación para riegos de surcos individuales de 50 %, y una eficiencia de aplicación promedio aproximada al 75 % en algodón, utilizando la tecnología de automatización del riego (Smith et al., 2005).

La primera experiencia en el uso de estas tecnologías para el arroz en Italia (Masseroni et al., 2018), logró demostrar una mejora sustancial en la eficiencia del tiempo que los trabajadores dedican al riego y un manejo del agua completamente controlado y eficiente.

Nivelación: sistemas con pendientes variables

En U.S.A. la nivelación fue reportada como la técnica que más impacto tiene en el ahorro del gasto de agua, sin afectar el rendimiento de arroz (Massey et al., 2014). Sin embargo, su implementación está limitada por los altos costos que esta tecnología implica. Existen nuevas técnicas de nivelación de precisión con pendiente variable, las cuales están siendo evaluadas en Uruguay (Bueno et al., 2020). Se indica que éstas permitirían disminuir los costos, realizar menos taipas y más rectas, lo que facilitaría la implementación de esta tecnología en cultivos comerciales. Estas técnicas permitirían regar en forma más eficiente y uniforme el cultivo de arroz y facilitarían la implementación de manejos alternativos de riego.

Monitoreo de riego con imágenes satelitales y drones

El uso de drones en campos de arroz permite obtener información de alta calidad a un bajo costo, facilitando la detección rápida de zonas con problemas de riego, enfermedades y/o fertilización, lo que ayudaría a la toma de decisiones de manejo y a la mejora de rendimientos (Carracelas et al., 2017a). Actualmente, existen programas disponibles que permiten la automatización de los vuelos (DeoneDeploy, Micasense Atlas Flight) y el monitoreo de los campos de arroz. El uso de cámaras multiespectrales y termales en drones puede ser utilizado, a su vez, para el monitoreo del riego y fertilización nitrogenada. Existen muchas plataformas satelitales que permiten la obtención de imágenes satelitales, sin o a un bajo costo, que pueden ser utilizadas para monitorear el manejo del riego en el cultivo de arroz (Hornbuckle y Carracelas, 2019).

Riego presurizado para el cultivo del arroz

El riego por aspersión es una de las técnicas de riego que permiten lograr importantes ahorros de agua en comparación con las técnicas actuales de riego por inundación (Stevens et al., 2012). Sin embargo, muchos agricultores que intentaron implementar este sistema para el cultivo del arroz han fracasado, debido a dificultades relacionadas con la mayor frecuencia de enfermedades en el cultivo, mayor presencia de malezas y problemas asociados con el avance del equipo en suelos pesados saturados de agua. El costo de la energía eléctrica puede llegar a ser otra limitante a considerar en la incorporación de esta tecnología para el riego del arroz (Stone y Schlegel, 2006). En U.S.A. (Stevens et al., 2012; Vories et al., 2013) como en Brasil (Crusciol et al., 2012) y Pakistán (Kahlown et al., 2007), la utilización de riego por aspersión mediante pivote ha mostrado tener buenos resultados, con rendimiento en grano de arroz similares al cultivo bajo inundación. En algunas experiencias realizadas en Brasil, se han obtenido rendimientos de 8,8 t ha^{-1}, lo que corresponde a un 87 % de la productividad observada en condiciones de inundación, con un uso de

agua de riego de 5.340 m^3 ha^{-1}. Sin embargo, se debe tener en consideración que la presencia de precipitaciones en la etapa reproductiva suplementa cerca de un 40 % la demanda hídrica (Pinto et al., 2020).

Una experiencia realizada en Japón, manteniendo el cultivo durante todas sus etapas de desarrollo en condiciones aeróbicas y con riego de 30 a 40 mm cuando la tensión en el suelo a 20 cm era menor a -60 kPa, no mostró mayores diferencias en los rendimientos, respecto al cultivo mantenido en condiciones de inundación, obteniéndose un rendimiento promedio entre 7,5 y 9,4 t ha^{-1} (Kato et al., 2009). Por otro lado, ensayos realizados en la India muestran una disminución en los rendimientos de un 24,6 % en comparación con el riego convencional. Los autores reportaron un ahorro de agua cercano al 20 %. Las disminuciones en el rendimiento se debieron a la disminución del número de granos por panícula y no a un incremento en la esterilidad floral o disminución del peso de los mil granos. Respecto a la productividad, se observó una gran diferencia entre el sistema convencional de riego por inundación respecto al riego aeróbico, alcanzándose entre 0,75 y 0,96 kg m^{-3}, lo cual fue casi cuatro veces mayor a lo observado en el riego convencional.

El sistema de riego por aspersión es una alternativa más para el cultivo del arroz que puede ser implementada, tomándose en cuenta las condiciones climáticas del sitio donde se quiere implementar, el tipo de suelo y las variedades comerciales disponibles, con el fin de lograr un resultado óptimo.

Consideraciones finales

Considerando que el arroz es el cereal de mayor consumo de agua y, a que, este el recurso es un bien cada vez mas escaso, es necesario contar con técnicas de riego que permitan utilizar el agua de manera mas eficiente. A nivel mundial, la técnica de riego más eficiente para el cultivo del arroz es el riego por aspersión, seguida del riego por mangas o politubos asociado al riego intermitente. Si bien la implementación de estas tecnologías requiere de una gran inversión en infraestructura y un fuerte componente de capacitación de agricultores arroceros, la adopción de estas tecnologías permitirá lograr un salto significativo en el mejor uso del agua, lo que tendrá grandes beneficios ambientales y productivos.

Referencias

Battello, C., Uraga, R., Gonnet, D., et al. 2009. Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay. Asociación Cultivadores de Arroz (ACA), Gremial de Molinos Arroceros (GMA); Universidad de la República (UDELAR)/Facultad de Agronomía; Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA); Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Montevideo, Uruguay.

Beare, S., Heaney, A. 2002. Climate change and water resources in the Murray Darling Basin, Australia. Impacts and possible adaptation. ABARE Conference Paper 02.11. 33 p. 2002 World Congress of Environmental and Resource Economists, Monterey, California. 24-27 June. Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics (ABARE), Canberra, Australia.

Becerra, C., Díaz, A., García, E. 2019. Análisis situacional cadena productiva del arroz en Colombia. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), Bogotá, Colombia.

Beecher, H.G., Hume, I.H., Dunn, B.W. 2002. Improved method for assessing rice soil suitability to restrict recharge. Aust. J. Exp. Agric. 42:297-307.

Blanco, F., Chebataroff, N., Deambrosi, E., et al. 1984. Riego. Arroz-Soja. p. 111-116. Blanco, F., Chebataroff, N., Deambrosi, E., et al. (eds.) Resultados de la experimentación regional en cultivos. 1983-84. CIAAB, EEE, Treinta y Tres, Uruguay.

Bandeira, S., Böcking, B. 2014. Riego de arroz por mangas. Grupo de Desarrollo de Riego, Donistar S.C., Salto, Uruguay.

Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P., et al. 2007a. Rice and water. Adv. Agron. 92:187-237.

Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M., Tuong, T.P. 2007b. Water management in irrigated rice: coping with water scarcity. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños. Philippines.

Bouman, B.A.M., Tuong, T.P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. Agric. Water Manage. 49:11-30.

Bueno, M., Roel, A., Faria, L., et al. 2020. Applying geotechnologies for grain yield intensification and diversification in Uruguay. In Int. Temp. Rice Conf. 7., Pelotas, RS. 9-12 February. Science & Innovation: feeding a world of 10 billion people: proceedings. Embrapa, Pelotas, RS, Brasil.

Cabangon, R.J., Tuong, T.P., Castillo, E.G., et al. 2004. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. Paddy Water Environ. 2:195-206.

Carracelas, G., Cora, P., Ferres, S. 2017a. Monitoreo de prácticas de manejo de riego en chacras comerciales. p. 56-59. En Zorrilla, G., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) Arroz 2017. Serie Técnica Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Montevideo, Uruguay.

Carracelas, G., Guilpart, N., Cassman, K. 2017b. Yield potential and yield gaps of irrigated rice in Uruguay and other rice producing countries. p. 7. In International Temperate Rice Conference, Griffith, NSW, Australia. 6-9 March. Griffith, NSW, Australia, 2017. Rice Research Development Committee (RRDC), Australia.

Carracelas, G., Guilpart, N., Grassini, P., et al. 2019a. Potencial y brecha de rendimiento de arroz irrigado en Uruguay y otros países arroceros. INIA Serie Técnica 250:53-56. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo, Uruguay.

Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., et al. 2019b. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. Agric. Water Manage. 222:161-172.

Carracelas, G., Hornbuckle, J., Verger, M., et al. 2019c. Irrigation management and variety effects on rice grain arsenic levels in Uruguay. J. Agric. Food Res. 2019:100008.

Carrijo, D.R., Akbar, N., Reis, A.F.B., et al. 2018. Impacts of variable soil drying in alternate wetting and drying rice systems on yields, grain arsenic concentration and soil moisture dynamics. Field Crops Res. 222:101-110.

Carrijo, D.R., Lundy, M.E., Linquist, B.A. 2017. Rice yields, and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. Field Crops Res. 203:173-180.

Cartwright, R., Lee, F. 2001. Management of rice diseases. p. 87-97. In Slaton N. (ed.) Rice production handbook. Arkansas Coop. Ext. Serv. University of Arkansas, Little Rock, Arkansas, USA.

Choi, J.D., Park, W.J., Park, K.W., et al. 2013. Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea. Paddy Water Environ. 11(1):241-248.

Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.L., 2000. A uniform and adaptative system for expressing rice development. Crop Sci. 40:436-443.

Crusciol, C., Toledo, M., Arf, O., et al. 2012. Water supplied by sprinkler irrigation system for upland rice seed production. Biosci. J. 28:34-42.

DANE-Fedearroz. 2017. Cuenta Satélite de la agroindustria del arroz, informe 2012-2016. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Bogotá, Colombia.

Dassanayake, D., Dassanayake, K., Malano, H., et al. 2009. Water saving through smarter irrigation in Australian dairy farming: use of intelligent irrigation controller and wireless sensor network. p. 4409-4417. In 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia. 13-17 July. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra, Australia.

Datta, A., Ullah, H., Ferdous, Z. 2017. Water management in rice. p. 255-277. In Chauhan, B.S., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice Production Worldwide. Springer International Publishing, New York, USA.

de Avila, L. A., Martini, L. F. D., Mezzomo, R. F., et al. 2015. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation. Agron. J. 107:442-448.

De Laulanie H. 1993. Technical presentation of the system of rice intensification based on Katayama's tillering model. Tropicultura 13:1.

DIEA. MGAP. 2019. Anuario estadístico 2000-2019. Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA), Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca MGAP), Montevideo, Uruguay. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2019 (acceso 2019).

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. Especial Gestión Hídrica (Chile) 111:41-45.

Dunn, B.W., Gaydon D.S. 2011. Rice growth yield and water productivity responses to irrigation scheduling prior to the delayed application of continuous flooding in South-East Australia. Agric. Water Manage. 98:1799-1807.

FAO. 2018. AQUASTAT. AQUASTAT Main Database, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html (acceso Julio 2018).

Fedearroz. 2012. Adopción masiva de tecnología (AMTEC). Guía de usuario. Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), Bogotá, Colombia.

Ferichani, M., Prasetya, D.A. 2011. Institutionalization on system of rice intensification (SRI): socio-economic aspects. J. Crop Weed 7:12-16.

Garrity, D.P., O'Toole, J.C. 1994. Screening rice for drought resistance at the reproductive phase. Field Crops Res. 39:99-110.

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. CSIRO Publishing, Clayton, Victoria, Australia.

Gillies, M.H., Smith, R.J., Williamson, B., et al. 2010. Improving performance of bay irrigation through higher flow rates. In: Conference: Irrigation Australia Conference and Exhibition - One Water Many Futures, Sydney, Australia.

G&M Poly. 2018. Aquator. G&M Poly, Cohuna, Victoria, Australia. http://gmpoly.com.au/product range/aquator (acceso 10-02-2018).

González, M., Saldarriaga, G., Jaramillo, O. 2014. Estimación de la demanda de agua: Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, Colombia.

Govindan, R., Grace, T. M., 2012. Influence of drip fertigation on growth and yield of rice varieties (*Oryza sativa* L.) Madras Agric. J. 99:244-247.

Grassi, C., Bouman, B.A.M., Castaneda, A.R., et al. 2009. Aerobic rice: crop performance and water use efficiency. J. Agric. Environ. Int. Dev. 103:259-270.

GRiSP (Global Rice Science Partnership). 2013. p. 164-168. In Rice almanac, 4th edition. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

He, G., Wang, Z.H., Cui, Z.L. 2020. Managing irrigation water for sustainable rice production in China J. Clean. Prod. 245:118928.

Henríquez, R., Henríquez, E. Sepúlveda, D., et al. 2018. Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas en arroz en Chile. Serie estudios para la innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

Herrera-Puebla, J., Hervis-Granda, G., González-Robaina, F., et al. 2019. Estudio sobre el balance hídrico del arroz en Cuba. Rev. Ing. Agríc. 9:48-59.

Hornbuckle, J., Carracelas, G. 2019. Herramientas tecnológicas para optimizar el manejo del riego en arroz. En Jornada, 6 de septiembre. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Tacuarembó, Uruguay. http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/13301/1/G.-Carracelas-Presentacion-J.Hornbuckle.pdf.

Humphreys, E., Meisner, C., Gupta, R., et al. 2005. Water saving in rice-wheat systems. Plant Prod. Sci. 8:242-258.

Humphreys, E., Robinson, D. 2004. Improving water productivity in rice cropping systems in Australia: institutions and policy. p. 885-900. In Mew, T.W., Bar, D.S., Peng, S., et al. (eds.) Rice science: innovations and impact for livelihood. Proceedings of the International Rice Research Conference, Beijing, China. September 2002. International Rice Research Institute, Chinese Academy of Engineering and Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing, China.

IPCC. 2000. Emissions scenarios - Summary for policymakers. Special Report on Emissions Scenarios (SRES). A Special Report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland.

Kahlown, M., Raoof, A., Zubair, M., et al. 2007. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. Agric. Water Manage. 87:292-298.

Kato, Y., Okami, M., Katsura. K. 2009. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. Field Crops Res. 113:328-334.

Koech, R.K., Smith, R.J., Gillies, M.H. 2014. A real-time optimization system for automation of furrow irrigation. Irrig. Sci. 32:319-327.

Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. Agric. For. Meteorol. 184:56-70.

Lampayan, R., Bouman, B., de Dios, J., et al. 2003. Adoption of water saving technologies in rice production in the Philippines. Extension Bulletin 548. 15p. Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan.

Lampayan, R.M., Bouman, B.A.M., De Dios, J.L., et al. 2005. Transfer of water saving technologies in rice production in the Philippines p. 112-132. In Thiyagarajan, T.M., Hengsdijk, H., Bindraban, P. (eds.) Proceedings of the International Symposium on Transitions in Agriculture for Enhancing Water Productivity, Tamil Nadu, India.

Lampayan, R.M., Rejesus, R.M., Singleton, G.R., et al. 2015. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. Field Crops Res. 170:95-108.

Li, Y., Barker, R. 2004. Increasing water productivity for paddy irrigation in China. Paddy Water Environ. 2:187-193

Lin, X., Zhu, D., Lin, X. 2011. Effects of water management and organic fertilization with SRI crop practices on hybrid rice performance and rhizosphere dynamics. p. 33-39. In Masumoto, T. Paddy and water.environment. Vol 9. Springer, Berlin, Germany.

Linquist, B. A., Anders, M. M., Adviento-Borbe, M.A., et al. 2015. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. Glob. Chang. Biol. 21:407-417.

Luo, L.J. 2010. Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China. J. Exp. Bot. 31:3509-3517.

MADR y CIAT. 2015. Análisis integral de sistemas productivos en Colombia para la adaptación al cambio climático. CONVENIO MADR-CIAT 20120382, Cali, Colombia.

Marchesi, C., Chauhan, B.S. 2019. The efficacy of chemical options to control *Echinochloa crus-galli* in dry-seeded rice under alternative irrigation management and field layout. Crop Prot. 118:72-78.

Masseroni, D., Moller, P., Tyrell, R. 2018. Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in Europe. Agric. Water Manage. 201:58-69.

Massey, J.H., Smith, M.C., Vieira, D.A.N., et al. 2018. Expected irrigation reductions using multiple-inlet rice irrigation under rainfall conditions of the Lower Mississippi River Valley. J. Irrig. Drain. Eng. 144:1-13.

Massey, J.H., Walker, T.W., Anders, M.M., et al. 2014. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. Agric. Water Manage. 146:297-304.

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2016. Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. Sci. Adv. 2:e1500323.

Muirhead, W.A., Blackwell, J., Humphreys, E., et al. 1989. The growth and nitrogen economy of rice under sprinkler and flood irrigation in South East Australia. Irrig Sci. 10:183-199.

Niblack, M., Sánchez, C.A., 2008. Automation of surface irrigation by cut-off time or cut-off distance control. Trans. ASABE. 24:611-614.

Nie, L., Peng, S. 2017. Rice Production in China. p. 33-52. In Chauhan, B., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice Production Worldwide, Springer International Publishing, New York, USA 2017.

Nishiuchi, S., Takaki, Y., Takahashi, H., et al. 2012. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice. Rice 5:2.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2015. Evaluación preliminar de genotipos de arroz bajo dos sistemas de manejo de agua. 66° Congreso Agronómico SACH y 13° SOCHIFRUT. 17-20 de noviembre, Valdivia, Chile. Sociedad Agronómica de Chile (ACH) y Sociedad Chilena de Fruticultura (SOCHIFRUT), Santiago, Chile.

Parent, B., Suard, B., Serraj, R., et al. 2010. Rice leaf growth and water potential are resilient to evaporative demand and soil water deficit once the effects of root system are neutralized. Plant Cell Environ. 33:1256-1267.

Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., et al. 2004. Water resources: Agricultural and environmental issues. Bioscience 54:909-918.

Pinto, M., Parfitt, J., Timm, L. et al. 2020. Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as afunction of water availability in different phenological phases. Field Crops Res. 248 (107714).

Praba, M.L., Cairns J.E., Babu, R.C., et al. 2009. Identification of physiological traits underlying cultivar differences in drought tolerance in rice and wheat. J. Agron. Crop Sci. 195:30-46.

Quezada, C., Hernaíz, S., Stolpe, N., et al. 2011. Efecto del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). Chil. J. Agric. Anim. Sci. 27:105-115.

Raine, S.R., Bakker, D.M. 1996. Increased furrow irrigation efficiency through better design and management of cane fields. In Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. pp 119125.

Ramesh, P., Vengatesan, D., Natrajan, S. 2019. SRI - A system of cultivation for increasing the knowledge level of the paddy farmers. Plant Arch. 19:2247-2250.

Rao, R. 2011. Estimation of efficiency, sustainability and constraints in SRI (system of rice intensification) vis-a-vis traditional methods of paddy cultivation in north coastal zone of Andhra Pradesh. Agric. Econ. Res. Rev. 24:325-331.

Rao, K.V.R., Gangwar, S., Keshri, R. 2017. Effects of drip irrigation system for enhancing rice (*Oryza sativa* L.) yield under system of rice intensification management. Appl. Ecol. Environ. Res. 15:487-495.

RGA. 2020. Rice and water. Rice Growers Association of Australia (RGA), Leeton, New South Whales, Australia.

RKB. 2020. How to manage water. Rice Knowledge Bank (RKB). Disponible en http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/growth/water-management (acceso 18 marzo 2020).

Rubicon Water. 2020. Rubicon, Melbourne, Victoria, Australia. Disponible en: https://www.rubiconwater.com/catalogue/farmconnect/ (acceso 19-03-2020).

Seck, P.A., Diagne, A., Mohanty, S., et al. 2012. Crops that feed the world 7: Rice. Food Sec. 4:7-24.

Shahidian, S., Serralheiro, R. 2012. Development of an adaptive surface irrigation system. Irrig. Sci. 30:69-81.

Smith, M.C., Massey, J.H., Branson, J., et al. 2007. Water use estimates for various rice production systems in Mississippi and Arkansas. Irrig. Sci. 25:141-147.

Smith, R.J., Raine, S.R., Minkovich, J. 2005. Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. Agric. Water Manage. 71:117-130.

Smith, R.J., Uddin, J.M., Gillies, M.H., et al. 2016. Evaluating the performance of automated bay irrigation. Irrig. Sci. 34:175-185.

Stevens, G., Rhine, M., Heiser, J. 2018. Rice production with furrow irrigation in the Mississippi River Delta region of the USA. p. 69-82. In Shah, F., Khan, Z.H., Iqbal, A. (eds.) Rice crop - current developments. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.74820.

Stevens, G., Vories, E., Heiser J., et al. 2012. Experimentation on cultivation of rice irrigated with a center pivot system. p. 233-254. In Lee, T.S. (ed.) Irrigation systems and practices in challenging environments. IntechOpen. doi:10.5772/30502.

Stone, L.R., Schlegel, A.J. 2006. Crop water use in limited-irrigation environments. p. 173-184. In Proceedings of the 2006 Central Plains Irrigation Conference, Colby, KS. 21-23 Feb. Central Plains Irrig. Assoc., Colby, Kansas, USA.

Tabbal, D.F., Bouman, B.A.M., Bhuiyan, S.I., et al. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. Agric. Water Manage. 56:93-112.

Tarlera, S., Capurro, M.C., Irisarri, P., et al. 2016. Yield-scaled global potential of two irrigation management systems in a highly productive rice systems. Sci. Agric. 73:43-50.

Tuong, P., Bouman, B.A.M., Mortimer, M. 2005. More rice, less water—integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. Plant Prod. Sci. 8:231-241.

Tuong, T.P., Bouman B.A.M., 2003. Rice production in water scarce environments. p. 53-67. In Kijn, J., Barker, R., Molden, D. (eds.) Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. CABI Publishing, Wallingford, UK.

Tuong, T.P., Cabangon, R.J., Wopereis, M.C.S. 1996. Quantifying flow processes during land soaking of cracked rice soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:872-879.

Vanitha, K., Mohandass, S. 2014. Effect of humic acid on plant growth characters and grain yield of drip fertigated aerobic rice (*Oryza sativa* L.) Bioscan. 9:45-50.

Vories, E.D., Stevens W.E., Tacker, P.L., et al. 2013. Rice production with center pivot irrigation. Appl. Eng. Agric. 29:51-60.

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.

Capítulo 23. Manejo del agua de riego en el cultivo de arroz en Chile

Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Hamil Uribe C., Gonzalo Carracelas G.

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los alimentos principales a nivel mundial, con una producción de 509,2 millones de toneladas (FAO, 2020) que provienen, mayoritariamente, de países asiáticos como China e India. Debido al incremento en la población mundial que alcanzaría los 10 billones de personas para el año 2050 (UN, 2015), se estima un incremento de la demanda por alimento entre un 60 % a 100 % (Van Der Mensbrugghe et al., 2009). Estudios realizados en diversos países arroceros incluidos en el atlas mundial (Global Yield Gap Atlas), indican que es posible continuar aumentando los rendimientos en las mismas áreas productoras de arroz, para satisfacer esta creciente demanda (Carracelas et al., 2017a).

La producción actual, relativa al rendimiento potencial del cultivo de arroz, se encuentra en el 60 % (Carracelas et al., 2019b; GYGA, 2019). Además, los rendimientos promedios de los campos arroceros a menudo comienzan a estabilizarse cuando alcanzan el 75 % a 85 % del potencial (Cassman et al., 2003; Lobell et al., 2009). Sin embargo, la disponibilidad del recurso hídrico para el cultivo podría ser insuficiente en India, Tailandia y Australia, entre otros, lo cual limitaría los aumentos de producción estimados, donde la optimización del uso del agua de riego juega un rol clave (Tuong y Bouman, 2003; Gaydon et al., 2010; Dunn y Gaydon, 2011). La reducción potencial estimada de los rendimientos a nivel mundial, debido a la menor disponibilidad de agua para riego, podría en promedio alcanzar los 18 millones de toneladas anuales de arroz (O'Toole, 2004). Por ello, la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico es un gran desafío para la producción de arroz, donde se necesita contar con alternativas de manejo que permitan lograr una mejora en la optimización y uso del agua, sin disminuir significativamente la producción de grano (Dunn y Gaydon, 2011).

En Chile, el uso de agua consuntiva para la agricultura es de 88 % (Valdés-Pineda et al., 2014; Fundación Chile, 2018). Específicamente, la estimación de la demanda en la región del Maule, el consumo agrícola de agua consuntiva corresponde a un 96,4 % del total del recurso hídrico disponible en la región. Por otro lado, en las Regiones de Ñuble y Biobío juntas, se estima que el consumo agrícola del agua corresponde a un 41,9 % (DGA, 2017).

En este contexto, aunque la superficie sembrada de arroz en el país es reducida, el agua desempeña un papel importante en la producción de grano. Actualmente, un 80 % de la superficie de arroz se cultiva bajo condiciones de inundación continua desde la siembra hasta madurez fisiológica, y el 20 % restante utilizando la metodología de siembra directa. En ambos casos se utilizan grandes volúmenes de agua que superan los 14.000 m^3 ha^{-1} (Hernaíz y Alvarado, 2007). En el cultivo del arroz se deben considerar las pérdidas de agua debido a la evapotranspiración de la planta, infiltración y percolación en el suelo, y a prácticas específicas de manejo del agua (por ejemplo, drenaje para aplicación de agroquímicos), como la preparación de suelo inicial y el drenaje del terreno antes del macollaje (Bouman et al., 2007). Así, el cultivo de arroz es altamente demandante del recurso hídrico.

La inundación del cultivo permite un control más efectivo de las malezas, aumento de la disponibilidad de nutrientes, menor incidencia de enfermedades y protección contra el frío. Así, el incremento progresivo de la lámina de agua, desde 15 hasta 25 cm, protege al cultivo de las bajas temperaturas durante las etapas fenológicas de inicio de panícula hasta la microsporogénesis. Esto se debe al efecto de amortiguador térmico que tiene el agua producto de su alto calor específico; práctica que es recomendada en Australia (Williams y Angus, 1994; Lacy et al., 2002; Humphreys et al., 2006).

Antecedentes históricos del manejo del agua en el cultivo del arroz

La introducción del cultivo de arroz se realizó en el año 1920 en Valparaíso y La Serena. Sin embargo, a pesar de las buenas temperaturas de la zona, la escasa disponibilidad de agua desestimó el cultivo en esas zonas. A pesar de la importancia de dicho recurso, no existe información sobre la utilización y manejo del agua de riego en las primeras siembras realizadas en el país. Los primeros antecedentes se remontan a principios del año 1930, en una siembra por almácigo-trasplante realizada en el Fundo Quilapán ubicado en los alrededores de San Fernando. En ella, la baja temperatura encontrada en el agua causó importantes reducciones en el rendimiento de grano que generaron pérdidas considerables de plantas en la entrada de todos los cuadros (Anríquez, 1934).

En 1937 existe evidencia de una mayor preocupación por el manejo del agua en el cultivo del arroz. En esa época, las principales prácticas de manejo estaban asociadas a la elección de suelos con escasa pendiente que favorecieran una altura de agua uniforme, construcción de pretiles en curvas de nivel, instalación de compuertas de madera que permitieran el paso del agua de un cuadro a otro y un rápido desagüe del campo en el momento de la siega, facilitando la entrada de los equipos de cosecha (Silva, 1937).

El manejo del agua recomendado durante el desarrollo del cultivo, consistía en realizar el primer riego cuando las plantas de arroz tuvieran unos 20 cm de altura, para favorecer el vigor de ellas y facilitar el desarrollo normal de sus raíces. Con posterioridad a este primer riego, se iniciaba el riego permanente que consistía en abrir las compuertas que alimentaban los cuadros superiores, para dejar que el agua saturara el suelo y alcanzara una altura de 5 cm. De esta manera, se permitía el paso del agua al cuadro siguiente, donde se repetía este procedimiento hasta inundar todos los cuadros. Cuando todos los cuadros estaban inundados se procedía a subir la altura del agua hasta los 15 a 20 cm, situación que se mantenía hasta la aparición de las primeras panículas. En esa etapa se retiraba el agua por espacio de 8 a 12 d, para volver a llenar los cuadros hasta que la panícula se empezaba a doblar por el peso de los granos. En este estado se suspendía la entrada del agua por 8 d, para proceder al drenaje de los cuadros. Ante la ocurrencia de lluvias, se recomendaba labrar con un arado sobre los pretiles, acelerando el drenaje y facilitar la cosecha. El caudal de agua utilizado en el arrozal era muy variable, pudiendo variar entre 1 y 2 L s^{-1} ha^{-1} a 5 L s^{-1} ha^{-1} o más (Silva, 1937).

La experiencia obtenida en la primera década del cultivo de arroz en el país y el auge de la producción arrocera, permitió determinar que el cultivo del arroz debía contar con un buen abastecimiento de agua. Dada esta situación, la zona productora de arroz del país se estableció al poniente de la zona entre las ciudades de Valparaíso y San Carlos. Esta distribución permitiría explotar suelos ´nuevos y con limitaciones` para ser usados por otros cultivos (Sims, 1969). Sin embargo, esta zona presentaría una mayor exposición de la planta a las bajas temperaturas y a las lluvias tempranas de otoño, lo que podía afectar el desarrollo normal de la planta y las actividades de cosecha, respectivamente (Villalobos, 1941; Elgueta, 1955; Torrealba, 1956). Este proceso de expansión del cultivo de arroz hacia el sur del país fue acompañado por la construcción de una nueva infraestructura de riego, como los embalses Digua y Bullileo, y el canal Melado, entre otros, que apoyaron el desarrollo de la producción de arroz en las zonas de Parral, Talca y Linares (Astorga, 1944; Olate, 1950; Torrealba, 1956).

En la década del 1940 se continuó con la recomendación de evitar el efecto negativo de las bajas temperaturas del agua, ya que causaba pérdida de plantas, retraso en el período de desarrollo del cultivo y una mayor producción de granos verdes. Para abordar este problema, se recomendaba mantener un bajo caudal y velocidad del agua de riego o utilizar calentadores de agua. El sistema de riego utilizado continuó siendo similar al de la década anterior, es decir, el uso del sistema inter-comunicante, donde el agua de la acequia principal ingresaba a los cuadros superiores directamente, dejando una lámina de agua de alrededor de 5 cm, para pasar por los cuadros siguientes. Cuando las plántulas tenían la segunda hoja, se aumentaba la altura del agua hasta alcanzar 18 a 20 cm, la que se mantenía hasta la macolla, momento en que se desaguaban los cuadros por 5 d para permitir el control de las malezas, fortalecer el desarrollo del sistema radicular de la planta y realizar la

segunda aplicación de nitrógeno en seco. Posteriormente, se subía el nivel del agua a una altura de 20 a 25 cm, y cuando el 80 % del arroz estaba maduro, el flujo de agua se detenía completamente. El gasto de agua en el cultivo fluctuaba entre 1 y 3 L s^{-1} ha^{-1} (Villalobos, 1941).

A principios de 1970, el manejo del agua se centraba en algunos factores que posibilitaran un uso más racional y eficiente. Los estudios realizados permitieron establecer que: a) la época de entrega del agua por los ríos y embalses a los agricultores ocurriría los primeros días de octubre, situación que impedía sembrar temprano; b) la presencia de desnivel en los suelos, el exceso de pretiles y la falta de drenaje de los suelos, hacían muy complejo el manejo uniforme del agua; c) el sistema de inundación era superior a las frecuencias de inundación de cada 7 y 15 d; d) la cantidad de agua utilizada durante el cultivo era de alrededor de 18.000 m^3 ha^{-1}, de los cuales 1.000 a 1.200 m^3 ha^{-1} se utilizaban a comienzos del llenado de los cuadros; e) la temperatura del agua en el arroz no era uniforme dentro de los cuadros y durante los meses de desarrollo del cultivo. Así, la mayor temperatura del agua se obtenía en diciembre, alrededor de las 18:00 h y en la salida del agua del predio. 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. Los cambios de temperatura del agua estuvieron más relacionados con la radiación solar que con la temperatura del aire; f) la disponibilidad de agua no era uniforme durante todo el desarrollo del cultivo. La mayor disponibilidad del agua se observaba en primavera, la que iba disminuyendo a inicios del verano, haciéndose crítica en enero y febrero (Sims y Alvarado, 1972).

En las décadas de 1980 y 1990, el manejo del agua continuó siendo un tema de preocupación y análisis. Estudios realizados por el INIA, indicaron que la eficiencia y manejo del agua de riego de los agricultores no era la más adecuada y que los caudales utilizados fluctuaban desde 2,1 a 11,2 L s^{-1} ha^{-1}, lo que significaba un uso de agua de 181 a 968 m^3 ha^{-1} d^{-1}. Por otro lado, las estimaciones de la evapotranspiración señalaban valores de entre 6 a 11 mm $día^{-1}$, dependiendo de la época del año y de las variaciones climáticas, lo que implicaba que un porcentaje importante de agua se perdía por percolación y filtraciones (Alvarado y Hernaíz, 1995). En relación con la altura del agua, entre siembra y floración se recomendaba utilizar 10 cm y desde floración y llenado de grano 20 cm (Maldonado y Alvarado, 1982; Alvarado y Hernaíz, 1995). Por otro lado, el corte del suministro del agua al arrozal se recomendaba que fuera en la etapa de floración, grano lechoso y grano harinoso, manteniendo el agua estancada hasta el consumo total, sin afectar negativamente el rendimiento en grano paddy (o con cáscara) ni la calidad industrial (Alvarado y Gallardo, 1994).

En la década del 2000 se señalaba que el mal manejo del agua afectaba directamente los componentes de rendimiento, a través del número de plantas y panículas ha^{-1}, número de granos por panícula, además de reducir el control de malezas (principalmente del hualcacho y del arroz rojo). Para mejorar esta situación, se recomendaba una buena adecuación del suelo, un buen diseño de los cuadros y canales que permitieran conducir y drenar el agua del cultivo. Además, un estudio del manejo del agua en arroz señalaba que una altura del agua de 10 cm a inicio de la siembra tenía un mejor control de malezas que una altura de 5 cm. Sin embargo, una altura de agua de 5 cm entre siembra y macolla estimulaba la formación de un mayor número de macollas y un buen desarrollo de las plantas. La temperatura del agua se debía mantener sobre los 15 °C, lo que se lograba manejando el volumen y la velocidad del caudal del agua en forma adecuada. La altura de agua al final del estado fenológico de macolla debía alcanzar 10 cm, mientras que iniciada la elongación de los nudos se debía elevar a una altura máxima de 30 cm. La detención del flujo de agua en el período de cosecha dependía de la textura del suelo. Así, en suelos arcillosos se podía detener el flujo del agua al final de la floración, mientras que, si el suelo era más friable, la detención del flujo de agua se podía realizar en la etapa de grano lechoso (Hernaíz y Alvarado, 2007).

Huella hídrica en el cultivo de arroz

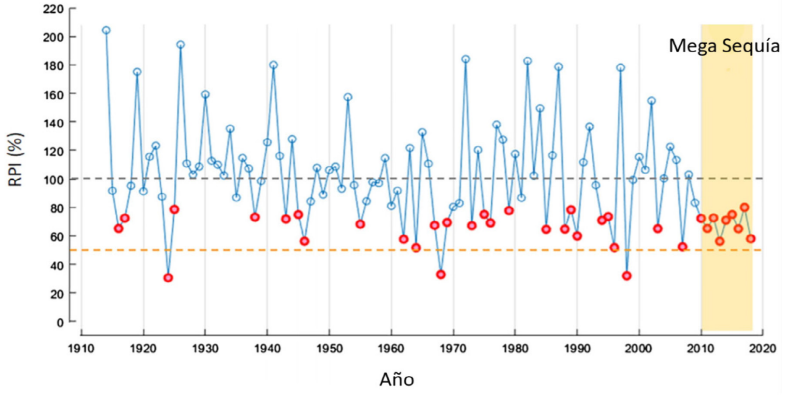
La huella hídrica corresponde al volumen de agua dulce utilizada directa o indirectamente para producir un bien (Hoekstra et al., 2009). En este sentido, se distinguen tres clasificaciones: a) la huella azul que corresponde al consumo de aguas superficiales y subterráneas lo que básicamen-

te corresponde al riego; b) la huella verde que corresponde al consumo del recurso que provienen de la lluvia almacenada en el suelo y; c) la huella gris que se refiere al volumen de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes basados en las normas vigentes de calidad de agua (Chapagain y Hoekstra, 2010). En Chile, estudios realizados por INIA (Uribe y Riquelme, 2013) determinaron que la huella hídrica en las principales zonas arroceras del país (Retiro y Parral) alcanzó a los 1.200 L de agua usada o evapotranspirada por kg de grano producido. De ellos, los valores que correspondieron a huella azul, verde y gris fueron de 1.120, 20 y 60 L kg^{-1}, respectivamente. Estos valores fueron calculados en base a los coeficientes teóricos del cultivo, adaptados a la realidad chilena y a la producción de arroz paddy. Mientras que la huella gris fue calculada considerando una fertilización de 100 kg ha^{-1} de Nitrógeno y 5 % de pérdidas por lixiviación.

Situación actual y perspectivas futuras del agua en las zonas arroceras

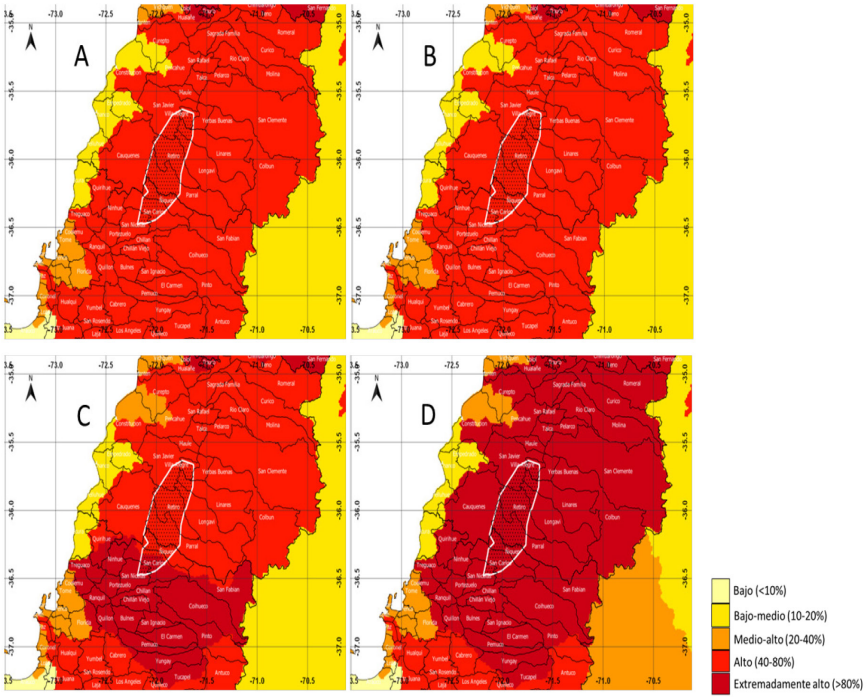
Un estudio en la zona central de Chile fue realizado con el fin de conocer los potenciales impactos en la agricultura chilena frente a los complejos escenarios del cambio climático (Santibáñez et al., 2008). Esta zona se encuentra afectada por una larga sequía que ha significado un importante déficit de las precipitaciones variando entre 20 % y 40 % (Garreaud et al., 2019). Esta situación, conocida como ´mega sequía`, ha sido uno de los eventos más largos registrados desde el siglo pasado.

El índice regional de precipitaciones (RPI) fue determinado considerando las precipitaciones anuales de seis estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) ubicadas entre las latitudes 32 y 37° S. Así, un evento de sequía es identificado cuando el valor del índice RPI es menor o igual al 80 %, indicando un déficit de precipitaciones igual o superior a 20 % (círculos rojos) (Figura 1). En ese estudio se detectaron nueve años consecutivos de sequía con un RPI entre 55 % a 80 % desde el año 2010 al 2018. Las proyecciones realizadas por el Instituto de Recursos Hídricos Mundiales (WRI), señalan que nuestro país se encuentra en una gran vulnerabilidad con respecto a la disponibilidad de agua para el año 2040. Además, el WRI prevé un incremento importante de la competencia por el recurso hídrico, el cual se incrementaría desde 2,67 a 4,41 puntos para el período entre 2010 y 2040 (Hofste et al., 2019), con una demanda del recurso hídrico igual o superior a un 80 %.



Fuente: Garreaud et al., 2019.

Figura 1. Índice de precipitación regional (RPI) de la zona central de Chile. Los círculos azules corresponden a años sin sequía, mientras que círculos rojos corresponden a años con sequía.



Fuente: Hofste et al., 2019.

Figura 2. Proyección de vulnerabilidad en disponibilidad de agua de riego para el sector arrocero de Chile. A; escenario optimista a 2030, B; escenario pesimista a 2030, C; escenario optimista a 2040, y D; escenario pesimista a 2040. El polígono de contorno blanco representa el sector arrocero de Chile. Los colores representan el porcentaje de necesidad del recurso hídrico en las diferentes zonas geográficas mostradas en la barra lateral.

Dada esta situación, el gran desafío para el sector arrocero nacional es la optimización y uso eficiente del agua de riego a través de estrategias de gestión hídrica inteligente que compatibilicen el ahorro de agua con mejoras en la producción, bajo condiciones limitadas de agua. Considerando que en los últimos 100 años no se han implementado de manera sistemática métodos eficientes para el riego del arroz en Chile, la Agenda de Innovación Agraria para la Cadena del Arroz planteó la necesidad de la evaluación y validación de tecnologías de manejo productivo que permitan lograr este objetivo (FIA, 2017). En este sentido, investigadores de INIA Quilamapu, han desarrollado estudios que incluyen la evaluación de diferentes sistemas de riego como el riego intermitente, riego por mangas con compuertas, riego por pulsos a través de válvulas automáticas, riego por aspersión, entre otros. Estas tecnologías están validadas en otros países, mejorando la eficiencia del uso del agua y la sustentabilidad del cultivo.

Situación de la infraestructura de riego en la zona arrocera

Según la información disponible gracias a la Asociación Digua Perquilauquén, se indica que parte importante del cultivo del arroz en Chile es regado por el sistema de riego Digua, el cual coordina la utilización de los excedentes de los ríos Longaví y Perquilauquén, y tiene una capacidad útil de 225 millones de m^3 (Asociación Digua Perquilauquén, 2020). El sistema Digua permite una seguridad de riego del 85 %, entregando agua a las comunas de Parral, Retiro (Maule) y Ñiquén (Ñuble). El sistema Digua cuenta con el embalse Digua (localizado en el río Cato), el canal alimentador Longaví, el canal alimentador Perquilauquén Cato y el nudo Hidráu-

lico de Remulcao. Para la distribución del agua, este sistema cuenta con tres canales matrices: Digua, Perquilauquén y Ñiquén. El canal alimentador Longaví posee una longitud de 6 km y una capacidad de 20 $m^3 s^{-1}$, permitiendo derivar recursos hídricos desde el río Longaví, para el llenado del embalse entre mayo y septiembre, y así abastecer las demandas de la temporada de riego. El canal alimentador Perquilauquén Cato posee una longitud de 12 km y una capacidad de 20 $m^3 s^{-1}$, derivando los recursos hídricos excedentes del río Perquilauquén hacia el nudo hidráulico de Remulcao. Por su parte, el nudo hidráulico de Remulcao está ubicado en el sector de Remulcao y está construido sobre el río Cato. En éste convergen las aguas del canal alimentador Perquilauquén y las provenientes del Embalse Digua y alimentador Longaví. Desde este lugar se distribuyen hacia los tres canales matrices de distribución que sirven al sistema. El canal matriz Digua, cuya bocatoma se encuentra en el nudo hidráulico Remulcao, tiene 47 km de longitud, una capacidad de 27 $m^3 s^{-1}$ y sirve un área de 47.300 ha físicas. Por otro lado, el canal matriz Perquilauquén es un cauce construido por el Estado hace más de 90 años e incorporado al sistema Digua en el año 1974. Su captación está en la ribera norte del río Perquilauquén y tiene una longitud de 31,8 km con una capacidad de 4,5 $m^3 s^{-1}$, cubriendo, aproximadamente, 10.600 ha. El canal matriz Ñiquén fue construido con posterioridad a las obras del proyecto original del Sistema Digua. Su bocatoma se ubica en la ribera sur del río Perquilauquén, en la confluencia de los ríos Cato y Perquilauquén. Tiene una longitud de 11,7 km y cerca de 12.000 ha bajo riego. Este cauce es administrado por la Organización de Usuarios Ñiquén y corresponde a la Región de Ñuble. A partir de estos canales matrices se desarrolla una red de distribución secundaria que tiene una longitud aproximada de 600 km. Actualmente, existen agricultores que riegan utilizando aguas subterráneas extraídas desde acuíferos a través de pozos profundos, drenes o zanjas (Henríquez et al., 2018).

Al norte del área regada por el sistema Digua, dentro de la Región del Maule, otras fuentes hídricas abastecen de agua al área arrocera, ubicada en general al poniente de la ruta 5 sur. Las aguas de riego son obtenidas desde varios ríos como el Putagán, Ancoa, Achibueno, Liguay y Longaví. Cada uno de estos ríos cuenta con organizaciones de usuarios del agua (OUA) que se encargan de su distribución desde el río y en canales, hasta llegar a los predios. Se debe destacar que esta zona también es abastecida por el Sistema Melado, que capta aguas del río del mismo nombre en la alta cordillera, las que son conducidas a través del túnel Melado. Esta zona cuenta con dos embalses, Ancoa y Bullileo, cuyas capacidades son de 80 y 60 millones de metros cúbicos, respectivamente.

Por otra parte, al sur del área regada por el sistema Digua, en la Región de Ñuble, el cultivo del arroz es regado con aguas superficiales provenientes, principalmente del río Ñuble. Cabe destacar que, en los últimos años debido a la creciente escasez hídrica, el riego con aguas subterráneas ha ido en aumento, constituyendo un apoyo importante para el riego del arroz.

Manejo actual del agua de riego en el cultivo de arroz

a) Siembra pregerminada

El sistema de siembra utilizado en Chile es mayoritariamente con semilla pregerminada. La semilla se mantiene durante 24 a 36 h sumergida en agua y luego se pone en contacto con el aire para que se inicie la germinación con la aparición del coleóptilo (36 a 48 h) (Donoso et al., 2019). La semilla pregerminada es distribuida en el campo al voleo, sobre una lámina de agua de 5 cm (Figura 3A). Esta labor se puede realizar de forma manual, por avión o a través de un trompo aplicador de fertilizantes. En este último caso, debe ser utilizada una semilla pregerminada previo a la aparición del coleóptilo, para evitar pérdidas por daño mecánico de la estruc-

tura antes mencionada. La dosis de semilla utilizada fluctúa entre 140 y 200 kg ha^{-1} en siembra manual y 120 kg ha^{-1} en caso de siembra por avión. Posterior a la siembra, el cultivo requiere un incremento de la lámina de agua de al menos 10 cm a partir del estado de plántula con 3 a 4 hojas (V3 a V4), manteniendo el nivel de agua hasta la etapa de madurez fisiológica. La lámina de agua se debe mantener, especialmente, en la etapa de inicio de primordio (R0), disminuyendo la entrada de agua fría en este periodo. Datos preliminares muestran que este sistema de siembra requiere por sobre los 18.000 m^3 ha^{-1} durante la temporada que se extiende por, aproximadamente, 160 d (Quezada et al., 2011; Henríquez et al., 2018; Donoso et al., 2019).

b) Siembra directa

Este tipo de siembra permite ahorrar agua durante la etapa vegetativa del cultivo, mejorar la eficiencia de las actividades de la siembra, fertilización y aplicación de herbicidas (Henríquez et al., 2018). Actualmente, cerca de un 20 % del cultivo de arroz en Chile se realiza mediante este tipo de siembra (Paredes et al., 2015). Este sistema requiere de una preparación de suelo a cota cero o micro nivelación láser (Henríquez et al., 2018). Para este tipo de siembra se requiere de una buena preparación de suelo. La siembra se puede realizar con una máquina sembradora de cereales, la cual debe calibrarse para dejar la semilla entre dos a tres centímetros de profundidad. La dosis de semilla para este tipo de siembra fluctúa entre 100 y 120 kg ha^{-1}. Además, sólo se requiere mantener la humedad del suelo para iniciar la germinación de la semilla, hasta que la planta tenga tres a cuatro hojas (V3 a V4). Posteriormente, una lámina de agua de alrededor de 5 a 10 cm se debe aplicar, la que se mantiene hasta la etapa de madurez fisiológica de la planta (Henríquez et al., 2018) (Figura 3B). Esta alternativa productiva requiere contar con canales de avance que permitan llenar rápidamente todos los pretiles de manera independiente y un canal de desagüe. Según estudios realizados en Chile, la siembra directa permite ahorrar más de un 20 % en agua de riego respecto de la siembra inundada, debido a que no se requiere inundación en los primeros 25 a 30 d del cultivo (Henríquez et al., 2018).

El diseño predial en el caso del cultivo del arroz bajo siembra directa debe considerar entradas y salidas de agua, con canales de avance para el ingreso rápido y homogéneo del agua a los cuadros, y drenajes que permitan el desagüe adecuado, para extraer el agua posterior a los riegos iniciales y evitar la pudrición de la semilla. Además, los drenajes deben permitir un manejo adecuado del predio, evitando inundaciones previas a la siembra. Estos canales de drenaje prestan una gran utilidad cuando se debe realizar la aplicación de herbicidas que requieren el retiro de la lámina de agua. Por otro lado, los canales de avance permiten el ingreso rápido a los cuadros para realizar los riegos, adecuándose a la necesidad fisiológica de la planta y a las recomendaciones de reposición de la lámina de agua que realizan los distintos proveedores de herbicidas. El primer riego se realiza aplicando una lámina de agua que permita humedecer hasta el doble de la profundidad de siembra. La lámina de agua debe permanecer alrededor de 2 d, para asegurar la humedad del suelo que permita la imbibición de la semilla. Posteriormente, los excesos de agua se drenan para evitar la pudrición de la semilla. Un segundo riego se puede realizar en caso de: a) falta de humedad en el suelo durante la aparición del coleóptilo; y b) aplicación de un herbicida pre emergente que requiere la aplicación de lámina de agua. En caso de no contar con precipitaciones (< 20 mm) se puede realizar un tercer riego para asegurar el establecimiento de las plantas (Henríquez et al., 2018). Una vez alcanzada la altura de la lámina de agua se sugiere que se detenga la salida del flujo, para que ésta se caliente durante el día, mejorando el uso del agua de riego y el crecimiento y desarrollo del cultivo. Posterior a la floración, se recomienda mantener el cultivo con una lámina de agua hasta que los granos del tercio superior de la panoja estén duros (Fundación Chile, 2011). Sin embargo, esta decisión es dependiente de la textura del suelo En caso de que el cultivo esté sembrado en suelos con alta capacidad de retención de agua, como sucede en varias zonas de Parral, se puede dejar de regar y detener la salida del flujo de agua.

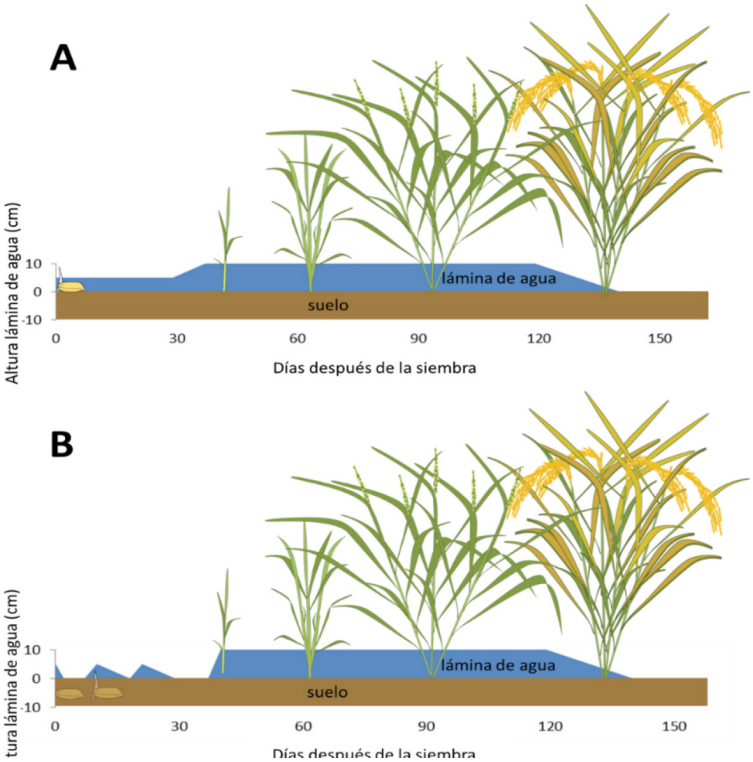


Figura 3. Uso del agua de riego en las diferentes alternativas productivas para el cultivo del arroz. Las figuras representan las diferentes etapas del cultivo del arroz considerando la siembra, estado de plántula, macolla, floración y madurez fisiológica. A, sistema de siembra con arroz pregerminado y B, sistema de siembra directa.

Nuevas alternativas de manejo del riego para el cultivo del arroz

Debido a los pronósticos negativos respecto a la disponibilidad de agua en Chile, se requiere la implementación de tecnologías que permitan disminuir el uso de agua de riego sin disminuir los rendimientos en grano. Para ello existen alternativas como el uso de una menor cantidad de agua en ciertos períodos del cultivo. Estas técnicas de manejo presentan ciertos desafíos que se deben abordar como un menor rendimiento en grano, mayor incidencia de malezas y falta de regulación de la temperatura del ambiente cercano al cultivo (Hernaíz y Alvarado, 2007). Numerosos estudios informan de reducciones de rendimiento que pueden llegar hasta un 70 % en los tratamientos de riego intermitente, en comparación con la técnica de riego continuo (Bouman y Tuong, 2001). Sin embargo, la reducción importante en el gasto de agua determina un aumento en la productividad del recurso hídrico (Tabbal et al., 2002). Se ha determinado también que esta técnica de riego intermitente podría alargar el período de duración del ciclo del cultivo, aumentando el riesgo de daño por frío durante la fase reproductiva (Dunn y Gaydon, 2011). A pesar de esta situación, una gran variabilidad existe en los resultados obtenidos con esta tecnología, dependiendo del estado fenológico de la planta en que se realizan los tratamientos, las variedades, severidad del estrés y tipo de suelo. Es así que, en algunos experimentos realizados en suelos arcillosos, la implementación del riego intermitente determinó una reducción en el uso del agua utilizada que fluctúa entre 15 % y 30 %, sin reducir significativamente el rendimiento del grano, en comparación con el riego continuo (Lampayan et al., 2005). El agua disponible en estos tratamientos nunca está por

debajo de la zona efectiva de raíces (Lampayan et al., 2009) o con un potencial hídrico del suelo superior a -20 kPa (Carrijo et al., 2017).

Medición de caudal

La primera dificultad que se encuentra al momento de querer manejar el agua en el cultivo es contar con el equipamiento que permita la medición del caudal. Para ello, existen diversas técnicas de medición como: a) el método del flotador, el cual tiene una baja precisión (error > 25 %) (Rantz, 1982); b) la metodología de vertedero con mayor precisión (error de 3 % a 5 %) (Bello y Pino, 2000); y c) otras metodologías de mayor costo y precisión como son el uso de aforadores (error < 5 %) (Reddy et al., 2013) y caudalímetros (error < 2 %) (MacCrometer, 2020).

Con el fin de evaluar la utilización de una tecnología de mayor precisión en la medición de caudal en el cultivo de arroz, un proyecto titulado ´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` fue desarrollado entre los años 2017 y 2020. El proyecto fue cofinanciado por INIA, FIA, Empresa Tucapel, Carozzi y apoyado por varias organizaciones gremiales (Donoso et al., 2018). Dentro de las actividades del proyecto se utilizaron tecnologías para la cuantificación del agua que se utiliza en el cultivo del arroz. Una de las tecnologías utilizadas fue la de los aforadores Parshall (Parshall, 1936; Foto 1) que permiten la medición de flujo de agua en un canal abierto. Para un funcionamiento dinámico, la canoa cuenta con un sensor de presión atmosférica (Foto 2), con registro digital de datos que permite determinar el nivel de agua y su distribución en el tiempo. Estas tecnologías dadas a conocer a los agricultores, permitieron cuantificar con mayor exactitud el volumen de agua utilizada para el cultivo del arroz en ensayos de campo y en predios de agricultores arroceros.

Foto 1. Aforador Parshall en campo de agricultor arrocero de la zona de San Carlos, 2020.

Foto 2. Sensor de presión atmosférica.

Riego intermitente

El riego intermitente consiste en intercalar períodos con y sin inundación. Numerosos estudios reportaron reducciones en el uso de agua, sin mermar el rendimiento en grano, aumentando significativamente la productividad o eficiencia de uso del agua de riego a nivel mundial (Bouman y Tuong, 2001; Bouman et al., 2007; Massey et al., 2014; Carracelas et al. 2019b). El éxito en la implementación de estos manejos alternativos de riego a escala comercial depende de una adecuada sistematización del predio; del diseño de un sistema de riego que posea una alta capacidad de entrada de caudales de agua que permitan una inundación rápida y uniforme de los cuadros; y de un programa integrado de manejo agronómico, control de malezas y fertilización de acuerdo con los nuevos requerimientos de manejo (Massey et al., 2014; Carracelas et al., 2019b). Este tipo de manejo del agua entrega tiempo extra al agricultor antes de que el suelo se seque, lo que permite solucionar eventuales problemas, como la rotura de bombas de riego, entre otros. La intensidad del secado del suelo no debe llegar a que las raíces no tengan acceso al agua, ya que el rendimiento y la calidad del arroz se pueden ver afectados negativamente.

La ausencia de una lámina de agua limitaría la implementación de este tipo de manejo en lugares con riesgo de ocurrencia de bajas temperaturas durante el periodo de floración. Una posible solución para evitar los riesgos de daños por frío es atrasar el periodo de inundación continua hasta el inicio de formación del primordio floral (Dunn y Gaydon, 2011), mediante la alternancia de la inundación del cultivo (Khepar et al., 2000) y reponiendo la lámina de agua cada vez que el suelo llega a saturación (Figura 4). Sin embargo, este proceso es dependiente del nivel de transpiración del cultivo, la evaporación, la percolación y la filtración lateral en el suelo.

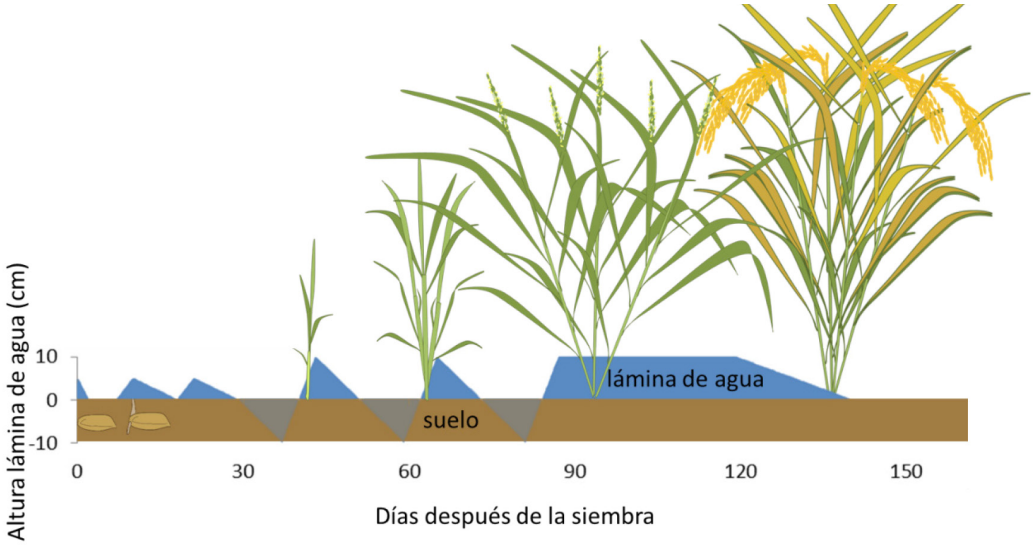
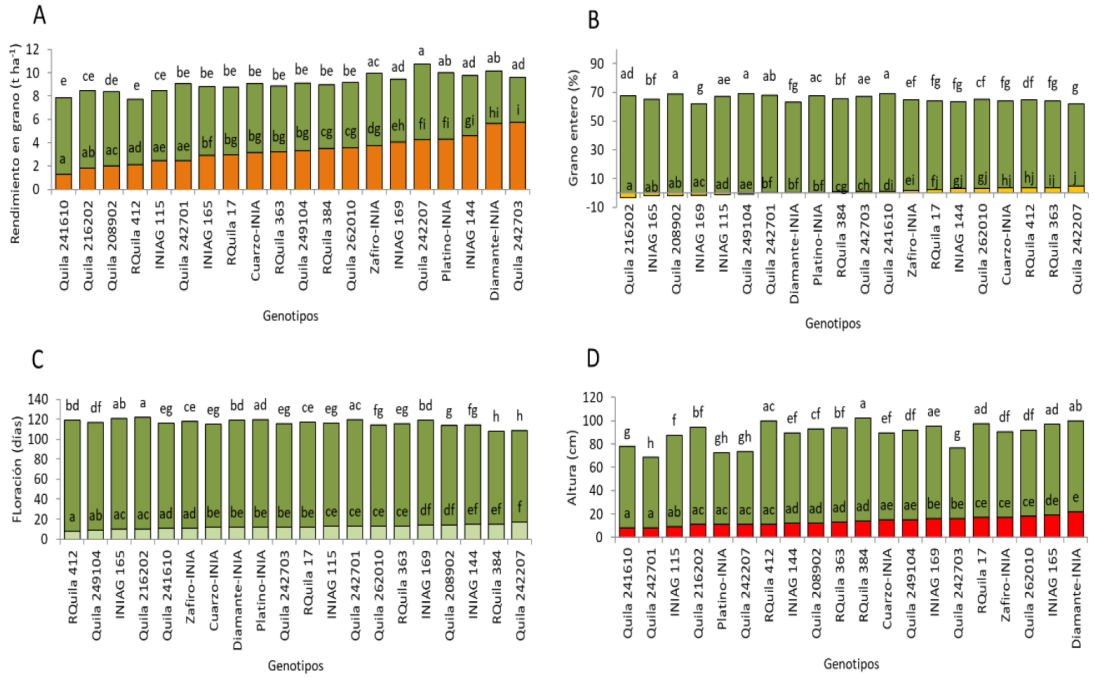


Figura 4. Riego intermitente en el cultivo del arroz. Las figuras representan las diferentes etapas del cultivo del arroz considerando la siembra, estado de plántula, macolla, floración y madurez fisiológica.

Estudios realizados en Chile revelan que la utilización de esta metodología hasta la etapa de macolla, permite un ahorro de agua de un 41 %, una disminución en un 30,6 % en los rendimientos en grano y un incremento en 14,2 % de la calidad del grano medido como porcentaje de grano entero (Quezada et al., 2011). En el riego convencional, la productividad fue de 0,5 kg m^{-3} y en el caso del riego intermitente alcanzó los 0,7 kg m^{-3}.

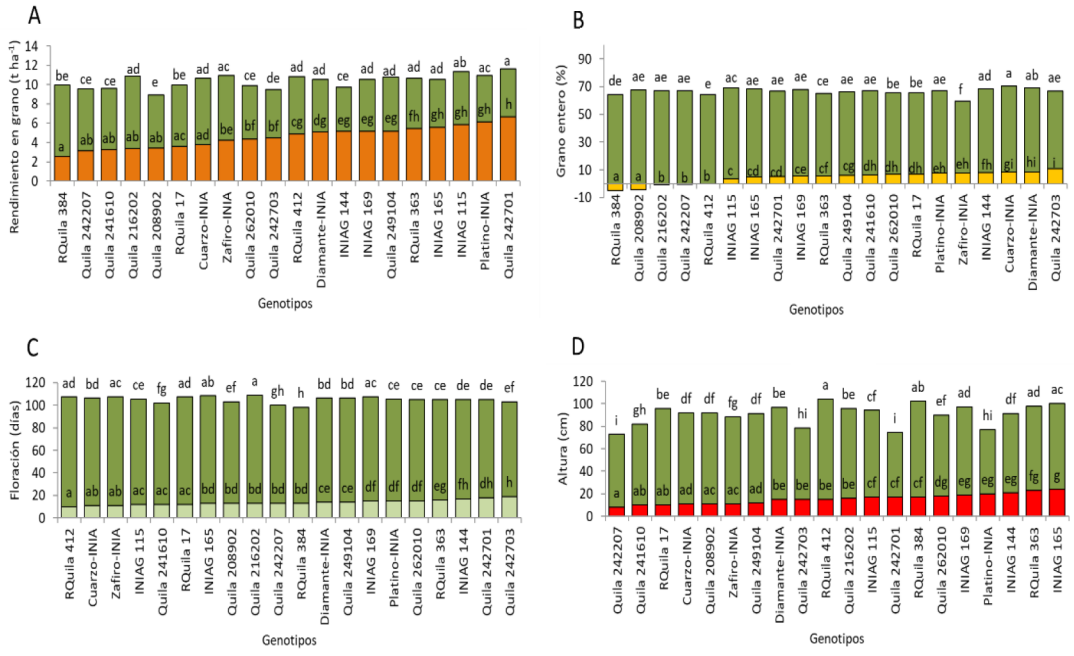
En las zonas de San Carlos y Parral, algunos estudios muestran que el uso de riego intermitente durante todo el periodo del cultivo tiene un efecto importante en el rendimiento en grano, grano entero, floración y altura (Figura 5) (Paredes et al., 2015). Específicamente en San Carlos, una disminución del rendimiento 1,3 y 5,8 t ha^{-1} fue observado en los genotipos Quila 241610 y Quila 242803, respectivamente (Figura 5A). Se observó también que el rendimiento industrial (% de grano entero) tuvo un comportamiento variable, disminuyendo o aumentando, dependiendo de los genotipos. Así, una mayor disminución del grano entero fue observada en el genotipo Quila 216202, con un -3,3 %, y el mayor incremento en Quila 242207 con un 4,9 % (Figura 5B). El período de siembra a floración se incrementó en todos los genotipos, entre 8 y 17 d en los genotipos RQuila 412 y Quila 242207, respectivamente (Figura 5C). Finalmente, la altura de la planta se afectó debido al riego intermitente, disminuyendo entre 8 y 22 cm en los genotipos Quila 241610 y ´Diamante-INIA`, respectivamente (Figura 5D).



Fuente: Paredes et al., 2015.

Figura 5. Riego intermitente en San Carlos temporada 2014-2015. A, rendimiento en grano en condición control (■) y disminución del rendimiento bajo riego intermitente (■); B, grano entero (%) en condición control (■) e incremento o disminución de grano entero (%) bajo riego intermitente (■); C, días a floración en condición control (■) e incremento de los días a floración bajo riego intermitente (■); D, altura de la planta en condición control (■) y disminución de la altura bajo riego intermitente (■).

En el caso de Parral, una disminución del rendimiento en grano se observó entre 2,6 y 6,7 t ha^{-1} para los genotipos RQuila 384 y Quila 242701, respectivamente (Figura 6A). Se observó que el comportamiento del grano entero fue genotipo dependiente, ya que en algunos casos disminuyó y en otros casos se observó un aumento (Figura 6B). Es así como la mayor disminución del grano entero fue observada en el genotipo RQuila 384, con un -4,7 % y el mayor incremento se observó en el genotipo Quila 242703 con un 10,6 %. El tiempo entre siembra y floración se incrementó en todos los genotipos (Figura 6C), por ejemplo, entre 10 y 19 d en los genotipos RQuila 412 y Quila 242703, respectivamente. Por último, la altura de la planta disminuyó entre 8 y 24 cm en los genotipos Quila 242207 y INIAG 165, respectivamente (Figura 6D).



Fuente: Paredes et al., 2015.

Figura 6. Riego intermitente en Parral durante la temporada 2014-2015. A, rendimiento en grano en condición control (■) y disminución del rendimiento bajo riego intermitente (■); B, grano entero (%) en condición control (■) e incremento o disminución de grano entero (%) bajo riego intermitente (■); C, días a floración en condición control (■) e incremento de los días a floración bajo riego intermitente (■); D, altura de la planta en condición control (■) y disminución de la altura bajo riego intermitente (■).

En la localidad de Parral, otros estudios utilizando riego intermitente con diferentes intensidades (entre siembra hasta inicio de panícula; temporada 2018-2019), han permitido conocer de mejor manera el manejo más adecuado de este tipo de riego. La comparación entre los rendimientos en grano del testigo con inundación permanente y el tratamiento de riego intermitente con reposición de la lámina de agua cuando el nivel de la lámina se encontraba a 5 cm bajo el nivel del suelo, no mostró diferencias significativas. Sin embargo, en el tratamiento donde la reposición de la lámina de agua se realizó cuando ésta estaba 10 cm bajo el nivel del suelo, se observó una disminución significativa en los rendimientos en grano de 27 %. Respecto al uso de agua, la mayor productividad se observó en el tratamiento con una disminución de lámina de agua bajo los 5 cm (0,89 kg m^{-3}) en comparación con el testigo (0,73 kg m^{-3}) y el tratamiento con lámina de agua bajo los 10 cm (0,53 kg m^{-3}) (Gutiérrez, 2019).

En general, el menor uso de agua puede afectar los rendimientos en grano. Este fenómeno ha sido observado en varios estudios internacionales (Tabbal et al., 2002; Dunn y Gaydon, 2011), como también el aumento del período de siembra a floración y la reducción de la altura de la planta. Sin embargo, un adecuado manejo de la lámina de agua, no inferior a los 5 cm bajo el nivel del suelo, y su aplicación entre siembra hasta inicio de panícula, puede minimizar los efectos negativos del riego intermitente. Otro aspecto importante a considerar al momento de utilizar esta práctica, es sembrar temprano con el fin de evitar que la etapa de formación del polen se traslade a fechas en las cuales se puedan presentar bajas temperaturas nocturnas (Dunn y Gaydon, 2011).

Finalmente, un problema complejo para la implementación de estas tecnologías representa la determinación precisa del nivel de agua en el campo. Para ello, se fabricó un instrumento que permite revisar a gran distancia la altura de la lámina de agua, con el fin de controlar los ciclos de

inundación y saturación propuestos en los sistemas de riego intermitente. En la Figura 7, se presenta un esquema del uso del sistema de flotación (flotador de PVC) y en la Foto 3 se representa un prototipo instalado en condiciones de campo.

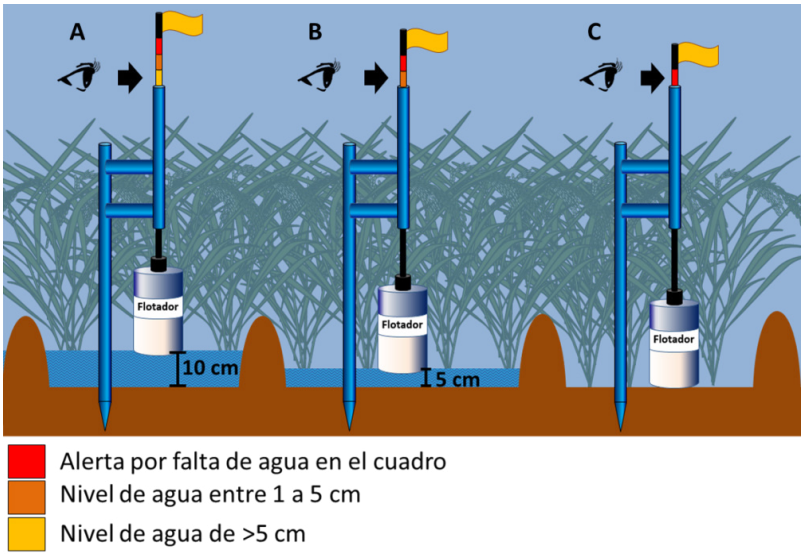


Figura 7. Representación de medidor de nivel de agua. A, nivel de agua de 10 cm (■), B, nivel de agua de 5 cm (■), y C, sin lámina de agua (■).

Foto 3. Medidor de nivel de agua en condiciones de campo.

Riego por mangas

Otra de las tecnologías utilizadas por primera vez en el país en el cultivo de arroz, fue el riego por mangas, técnica ampliamente utilizada en U.S.A., Argentina, Brasil y Uruguay. Las ventajas de esta tecnología son: bajo costo; mejor eficiencia de uso del agua de riego, ya que reduce las pérdidas de agua por distribución y mejora la uniformidad del riego gravitacional convencional; incrementa el número de hectáreas regadas por persona (hasta 120 ha); y facilita la velocidad del establecimiento de la lámina de agua en el predio. Esta tecnología permite la implementación de manejos de riego alternativos, como el riego intermitente en campos comerciales (Massey et al., 2014; Carracelas et al., 2017b). El proyecto apoyado por la Fundación para la Innovación Agraria (FIA), permitió instalar mangas de riego en los campos experimentales de arroz y en campos de agricultores para evaluar su viabilidad y efectividad, y difundir su uso en Chile (Foto 4).

Foto 4. Utilización de mangas de riego por agricultor de la zona de Parral.

Junto al sistema de riego por mangas, se implementó por primera vez en el país, el uso del sistema de riego por pulsos en el predio de un agricultor arrocero (Foto 5).

Foto 5. Validación de uso de válvula de riego por pulsos en campo de agricultor. Parral 2019-2020. Gentileza Marcelo Ibáñez.

Esta tecnología fue evaluada en la comuna de Parral durante las temporadas 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020 (Figura 8). Se comparó el sistema de riego por mangas, utilizando el sistema de siembra directa y siembra pregerminado. En las temporadas 2017-2018 y 2019-2020, el sistema de riego mediante mangas de riego se relacionó con un incremento en los rendimientos en grano de 2 t ha^{-1} en el sistema de siembra pregerminado (Figura 8A y 8C). Durante la temporada 2018-2019 no se observaron diferencias en los rendimientos entre los tratamientos (Figura 8B). Además, se observó una importante disminución en los rendimientos respecto a la temporada anterior, cercana a un 20 %. Adicionalmente, no se observaron diferencias entre las variedades evaluadas, ´Zafiro-INIA`, ´Platino-INIA` y ´Cuarzo-INIA`.

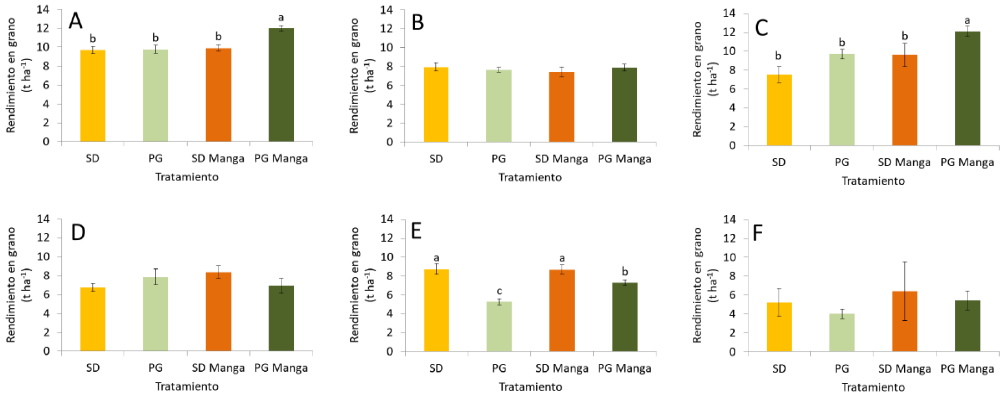


Figura 8. Efecto del riego y sistema de siembra en el rendimiento en grano de arroz en diferentes condiciones de riego y sistemas de siembra. A, B y C, temporada 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020, respectivamente. Los ensayos fueron sembrados el 30 de octubre con una dosis de semilla de 140 kg ha^{-1}. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$; test LSD Fisher).

Durante la ejecución del proyecto se pudo demostrar que el uso de mangas de riego incrementa hasta tres veces la velocidad de llenado de los cuadros, lo cual es una gran ventaja para los agricultores que, en algunos casos, se pueden demorar hasta 10 d con el sistema de llenado cuadro a cuadro utilizado normalmente (Donoso et al., 2018). Por otra parte, las mangas permitieron un menor uso de agua en siembra directa, alrededor de 11.000 m^3 ha^{-1}, comparado con la siembra pregerminado, sin mangas de riego, que utilizó 16.000 m^3 ha^{-1}.

Respecto a la productividad de agua, se observó que el sistema más eficiente para el cultivo del arroz fue la siembra directa con riego a través de mangas de riego, la que alcanzó una productividad de agua de 0,7 a 1,0 kg de arroz por m^3 de agua utilizada en el riego durante toda la temporada (Cuadro 1). En tanto, el sistema menos eficiente fue la siembra con arroz pregerminado con riego convencional, que tuvo una productividad de agua de entre 0,4 y 0,6 kg de arroz por m^3 de agua utilizada en el riego.

Cuadro 1. Productividad de agua en los ensayos de dos temporadas en la comuna de Parral.

Tratamiento	2017-2018	2018-2019	2019-2020
	kg m^{-3}		
Siembra directa sin manga	0,78	0,58	0,56
Pregerminada sin manga	0,59	0,44	0,58
Siembra directa con manga	1,02	0,67	0,78
Pregerminada con manga	0,79	0,53	0,77

Análisis económicos preliminares del uso de riego con mangas para el cultivo de arroz (2017-2018 y 2018-2019), muestran que el uso de esta metodología podría ser viable para los agricultores arroceros de Chile. Esta tecnología, requiere inversiones amortizadas por unidades requeridas por hectárea (mangas plásticas, compuertas, insertor de compuertas, tacho plástico de unión y descompresión, y adecuaciones de mini contenedores). Se debe considerar que el uso de mangas de riego en siembra con arroz pregerminado, generó en promedio mayores rendimientos en grano en comparación con el sistema de riego convencional, con una relación beneficio/costo superior en comparación con su competidor sin mangas (González et al., 2020).

Riego por aspersión

Otra tecnología evaluada por primera vez en el país fue el uso de riego por aspersión en arroz. En los Campos Experimentales de arroz en Parral y San Carlos, se instaló un sistema experimental para evaluar su uso potencial en el cultivo de arroz (Foto 6). Se trata de un sistema de riego que es utilizado en países como Brasil y U.S.A. Paralelo a este trabajo experimental, un agricultor de la zona de Parral utilizó un pivote central para regar arroz en forma comercial. El uso experimental de este sistema de riego no logró obtener rendimientos superiores a 7 t ha^{-1}.

Foto 6. Riego presurizado experimental para el cultivo del arroz en parcela experimental de la comuna de San Carlos.

En el caso del sistema de riego por aspersión, los rendimientos fueron inferiores a los sistemas que mantienen inundación permanente (Figura 9). En la temporada 2017-2018, se determinó que este sistema permite lograr rendimientos inferiores a las 6 t ha^{-1}, independiente de la ubicación de la planta dentro de la línea de aspersión. En cambio, durante la temporada 2018-2019 se observó un incremento en las expectativas de rendimientos en la comuna de Parral, obteniéndose rendimientos en grano de hasta 8 t ha^{-1}, a diferencia de lo observado en San Carlos, donde los rendimientos fueron inferiores a 6 t ha^{-1}.

El uso de esta tecnología necesita adaptar una nueva forma de manejo agronómico para el cultivo del arroz como, por ejemplo, control de malezas (control de malezas no acuáticas, tipo de productos, dosis, épocas de aplicación, entre otros), fertilización (fertirrigación, dosis, épocas de aplicación de macro y micronutrientes), caudales y temperatura del agua de riego, especialmente durante la microsporogénesis y floración (etapas sensibles a las bajas temperatura), y costos de producción, entre otros.

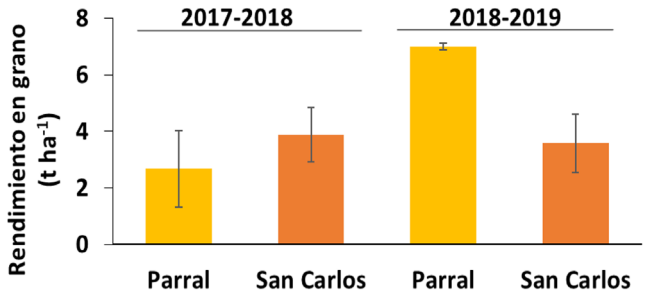


Figura 9. Rendimiento de arroz bajo riego por aspersión. Las barras de error corresponden al error estándar.

Si bien, los resultados muestran un desarrollo rentable para el cultivo del arroz utilizando la metodología de riego por mangas, especialmente cuando se utiliza sistema de siembra de arroz pregerminado, se debe considerar que el análisis no garantiza que el resultado se cumpla completamente. Esto debido a que el cultivo del arroz está sujeto a una serie de restricciones agroclimáticas y económicas como:

1) Altas o bajas temperaturas en periodos críticos del cultivo (etapa reproductiva) que puedan causar una disminución en los rendimientos en grano.

2) Falta de agua para riego en periodo crítico para el cultivo (etapa reproductiva), lo que puede provocar una fuerte disminución en los rendimientos en grano.

Consideraciones finales

Finalmente, tomando en cuenta que más del 80 % del sector arrocero continúa utilizando la metodología de siembra con arroz pregerminado, los resultados positivos en términos agronómicos y económicos, muestran que el uso del sistema de riego por mangas podría ser considerado como una alternativa para los agricultores arroceros de Chile. Por otro lado, el uso de este sistema para siembra directa, a pesar de no significar un beneficio económico para el agricultor, permitiría una mejor utilización recurso hídrico, el que es cada vez más escaso.

Referencias

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. Hernaíz, S. 1995. Riego. p. 22-24. En Manual de producción de arroz. Programa de reconversión de suelos degradados. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Anríquez, C. 1934. El cultivo del arroz y sus posibilidades en Chile. Tesis de pregrado. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Escuela de Agronomía, Santiago, Chile.

Asociación Digua Perquilauquén. 2020. Infraestructura. http://embalsedigua.cl/web/?page_id=7274. Revisado el 23 de marzo de 2020.

Astorga, M. 1944. Elaboración industrial del arroz Nacional. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

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.

Bouman, B., Tuong, T. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. Agric. Water Manage. 49:11-30.

Carracelas, G., Cora, P., Ferres, S. 2017b. Monitoreo de prácticas de manejo de riego en chacras comerciales. p. 56-59. In Zorrilla, G., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) Arroz 2017. INIA Serie Técnica 233. INIA, Montevideo, Uruguay. http://doi.org/10.35676/INIA/ST.233

Carracelas, G., Guilpart, N., Grassini, P., et al. 2017a. Evolución del rendimiento del arroz producido en Uruguay y comparación con otros países arroceros. p. 51-55. In Zorrilla, G., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) Arroz 2017. INIA Serie Técnica 233. INIA, Montevideo, Uruguay. http://doi.org/10.35676/INIA/ST.233

Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., et al. 2019a. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. Agric. Water Manage. 222:161-172.

Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J.E., et al. 2019b. Manejo del riego y productividad del agua en el cultivo de arroz en Uruguay. p. 49-52. In Terra, J., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) Arroz 2019. INIA Serie Técnica 250. INIA, Montevideo, Uruguay.

Carrijo, D.R., Lundy, M.E., Linquist, B.A. 2017. Rice yields, and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. Field Crops Res. 203:173-180.

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. Environ. Resour. 28:315-358.

Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. 2010. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective value of water. Ecol. Econ. 70:749-758.

DGA. 2017. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), División de Estudios y Planificación. Unión Temporal de Proveedores Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros Ltda., 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. Especial Gestión Hídrica 111:41-45.

Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V., et al. 2018. Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz (*Oryza sativa*) en Chile. XIII Conferencia Internacional de Arroz para América Latina y el Caribe, Piura, Perú. 14-19 mayo. Fondo Latinoamericano de Reservas (FLAR), Bogotá, Colombia.

Dunn, B.W., Gaydon, D.S. 2011 Rice growth, yield and water productivity responses to irrigation scheduling prior to the delayed application of continuous flooding in south-east Australia. Agric. Water Manage. 98:1799-1807.

Elgueta, L. 1955. Organización de la cooperativa de productores de arroz de San Carlos. Simiente 25:80-81.

FAO. 2020. Perspectivas de cosechas y situación alimentaria - Informe trimestral mundial N° 2, julio 2020. FAO, Roma, Italia.

FIA. 2017. Agenda de innovación agraria para la cadena del arroz en Chile. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.

Fundación Chile. 2011. Manual de recomendaciones del cultivo de arroz inundado desde siembra. Programa Convenio Subsecretaria de Agricultura-Fundación Chile, Santiago, Chile.

Fundación Chile. 2018. Escenarios hídricos 2030. Radiografía del agua: Brecha y riesgo hídrico en Chile. Fundación Chile, Santiago, Chile.

Garreaud, R., Boisier, J., Montecinos, A., et al. 2019. The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. Int. J. Climat. 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.

González, J., Donoso, G., Becerra, V., et al. 2020. Factibilidad económica de la implementación de mangas de riego en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile. 70° Congreso Agronómico de Chile, Universidad Católica, Campus San Joaquín, Santiago, Chile.

Gutiérrez, J. 2019. Efecto del riego intermitente sobre el cultivo del arroz. 45p. Tesis de pregrado. Universidad Adventista de Chile, Facultad de Ingeniería y Negocios, Chillán, Chile.

GYGA. 2019 Global Yield Gap and Water Productivity Atlas. Available at http://www.yieldgap.org/ (Acceso 2019).

Henríquez, R., Henríquez, E., Sepúlveda, D., et al. 2018. Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas en arroz en Chile. Serie Estudios para la Innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

Hernaíz, S., Alvarado, R. 2007. Manejo del agua en el arrozal. p. 49-57. En Alvarado R. (ed.) Arroz. Manejo tecnológico. Boletín N° 162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M. 2009. Water Footprint Manual, State of the Art 2009. Water Footprint Network, Enschede, Netherlands 2 University of Twente, Enschede, Netherlands WWF-UK, Godalming, UK.

Hofste, R., Kuzma, S., Walker, S., et al. 2019. Aqueduct 3.0: Updated decision-relevant global water risk indicators. Technical note. World Resources Institute, Washington, DC, USA. https://www.wri.org/resources/data-sets/aqueduct-global-maps-30-data

Humphreys, E., Lewin, L.G., Khan, S., et al. 2006. Integration of approaches to increasing water use efficiency in rice-based systems in south-east Australia. Field Crops Res. 97:19-33.

Khepar, S., Yadav, A., Sondhi, S., et al. 2000. Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices. Irrig. Sci. 19:199–208.

Lacy, J., Clampett, W., Lewin, L., et al. 2002. Ricecheck recommendations. NSW Agriculture, Yanco, NSW, Australia.

Lampayan, R., Bouman, B., De Dios, J., et al. 2005. Transfer of water saving technologies in rice production in the Philippines. p. 111-129. In Thiyagarajan, T.M., Hengsdijk, H., Bindraban, P. (eds.) Proceedings of the International Symposium on Transitions in Agriculture for Enhancing Water Productivity, Killikulam. 23-25 Sept. 2003. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

Lampayan, R.M., Palis, F.G., Flor, R.B., et al. 2009. Adoption and dissemination of "safe alternate wetting and drying" in pump irrigated rice areas in the Philippines. 60th International Executive Council Meeting & 5th Asian Regional Conference, New Delhi, India. 6-11 Dec. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), New Delhi, India.

Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. Annu. Rev. Environ. Resour. 34 179-204.

MacCrometer. 2020. Medidores McCrometer de hélice. 24545-00 Rev. 4.4. 27p. https://www.mccrometer.com

Maldonado, I., Alvarado, R. 1982. Algunos aspectos del manejo del agua en el arroz. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 13:20-23.

Massey, J.H., Walker, T.W., Anders, M.M., et al. 2014. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. Agric. Water Manage. 146:297-304.

O'Toole, J.C. 2004. Rice and water: The final frontier. Proceedings of the First International Conference on Rice for the Future, Bangkok. 31 Aug.-2 Sept. 26. Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

Olate, H. 1950. Industria del arroz en Chile y sus proyecciones económicas. Memoria Licenciado Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad de Chile. Memorias 11:161-222.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2015. Evaluación preliminar de genotipos de arroz bajo dos sistemas de manejo de agua. 66° Congreso Agronómico SACH y 13° SOCHIFRUT. 17-20 de noviembre, Valdivia, Chile.

Parshall, R. L. 1936. The Parshall measuring flume. Rep. Nr 423, Colorado Experiment Station, Colorado Agricultural College, Fort Collins, Colorado, USA.

Quezada, C.; Hernaíz, S.; Stolpe, N., et al. 2011. Efecto del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) Chil. J. Agric. Anim. Sci. 27:105-115.

Rantz, S. E. 1982. Measurement and computation of streamflow. USGS Water-Supply Paper 2175.

Reddy, M., Jumaboev, K., Matyakubov, B., et al. 2013. Evaluation of furrow irrigation practices in Fergana Valley of Uzbekistan. Agric. Water Manage. 117:133-144.

Santibáñez Q., Santibáñez, F., Solis, L. 2008. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios del cambio climático. Centro de Agricultura y Medio Ambiente y Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 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. 1969. El cultivo del arroz. El Campesino 100:44-71.

Sims, G., Alvarado, R. 1972. Control de malezas. En Manual de producción de arroz. Boletín Técnico N°54. p. 69-78. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Tabbal, D.F., Bouman, B.A.M., Bhuiyan, S.I., et al. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. Agric. Water Manage. 56:93-112. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00007-0.

Torrealba, S. 1956. El problema del arroz en Chile. Tesis de pregrado para optar a título de Ingeniero Comercial. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

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.

UN. 2015. World population prospects: The 2015 revision, key kindings and advance tables. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Working Paper No. ESA/P/WP.241. United Nations, New York, USA.

Uribe, H., Riquelme, F. 2013. Huella hídrica en arroz. p. 143-146. En Osorio, A. (ed.) Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Serie Actas N° 50. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), La Serena, Chile.

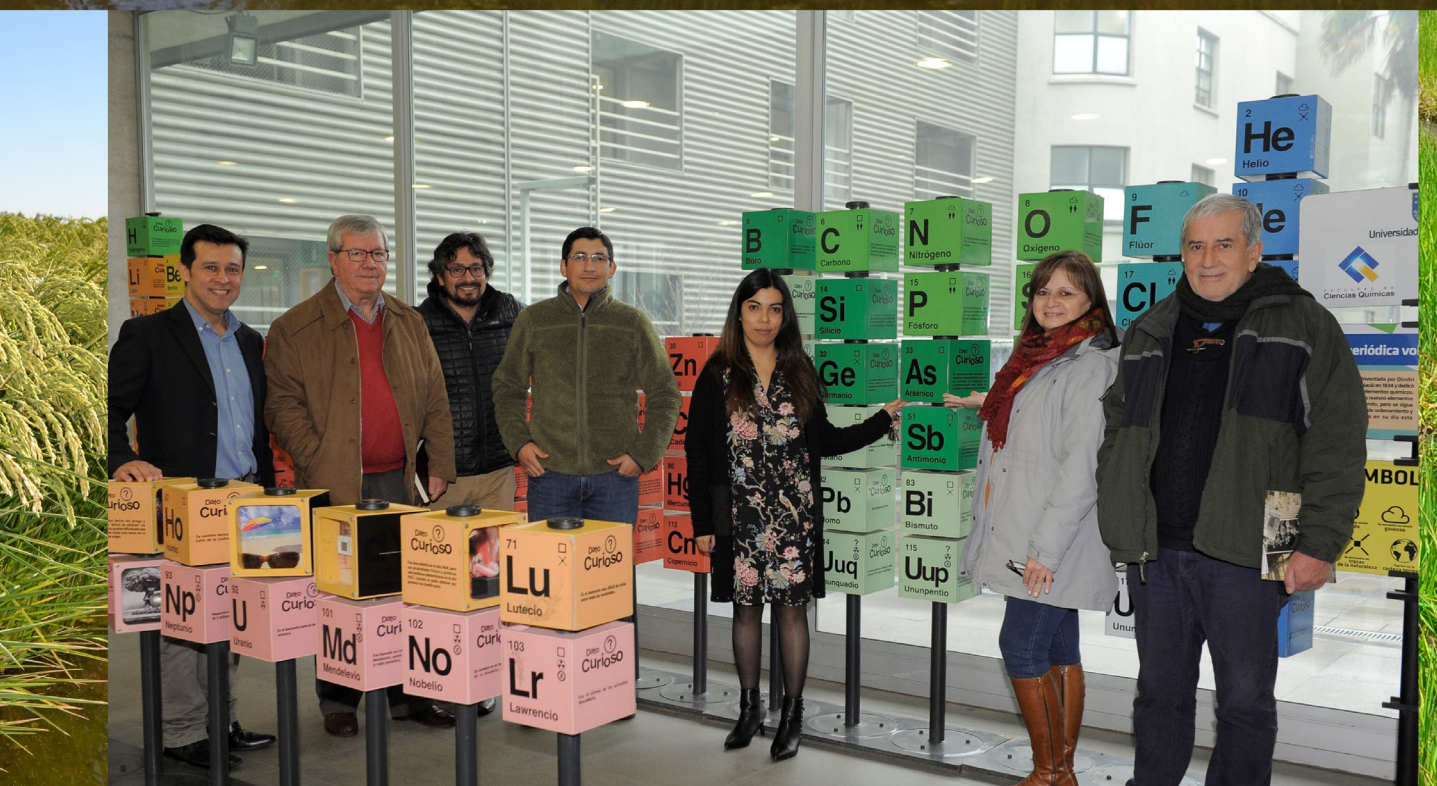
Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., et al. 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. J. Hydrol. 519:2538-2567.

Van Der Mensbrugghe, D., Rodarte, I.O., Burns, A., et al. 2009. How to feed the world in 2050: Macroeconomic environment, commodity markets—a longer term outlook. MPRA Paper Nr 19061.

Villalobos, E. 1941. El cultivo del arroz y su importancia económica. 81 p.Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

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.

204
203
306


He
Helio
B
Boro
C
Carbono
N
Nitrógeno
O
Oxígeno
F
Flúor
Si
Silicio
P
Fósforo
Ge
Germanio
As
Arsénico
Sb
Antimonio
Pb
Bi
Bismuto
Uup
Ununpentio
Lu
Lutecio
Np
Neptunio
U
Uranio
Md
Mendelevio
No
Nobelio
Lr
Lawrencio
Universidad
Ciencias Químicas

SECCIÓN VIII. INOCUIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Capítulo 24. Emisiones de gases de efecto invernadero en producción de arroz de riego

Walkyria B. Scivittaro, Rogério O. de Sousa, Leandro S. da Silva, Santiago V. Cuadra, Alexandre B. Heinemann

Aspectos generales

El efecto invernadero es un fenómeno natural de calentamiento térmico de la Tierra, responsable de la mantención de la temperatura y condiciones climáticas favorables para los seres humanos y otros organismos vivos. Se trata de un proceso físico que ocurre cuando parte de la radiación infrarroja es emitida por la superficie terrestre y absorbida por determinadas trazas de gases presentes en la atmósfera, llamados gases de efecto invernadero (GEI), que irradian parte del calor de vuelta a la superficie terrestre (IPCC, 2015). El aumento de la concentración de GEI causa un desequilibrio energético y, en consecuencia, la elevación de la temperatura del planeta (Campos et al., 2018). Los GEI de mayor interés climático son el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3), hexafluoruros y halocarburos (IPCC, 2001). Entre los GEI, CO_2, CH_4 y N_2O se consideran los más relevantes, debido a la capacidad de retener la radiación y su tiempo de permanencia en la atmósfera (WMO, 2013; IPCC, 2015). Con el fin de comparar la capacidad de dos GEI en retener el calor en la atmósfera, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha desarrollado el concepto ´potencial de calentamiento global` (PAG). El CH_4 y N_2O poseen PAG 34 y 298 veces mayor potencial que CO_2, respectivamente, considerando un período de permanencia de 100 años (IPCC, 2013), lo que explica su relevancia en la contabilización de emisiones de GEI, aunque se emiten en cantidades mucho menores que el CO_2.

A pesar de que los GEI están presentes en la atmósfera, las concentraciones de CO_2, N_2O y CH_4 están directamente influenciadas por la actividad antrópica (Isherwood, 2000). El desarrollo industrial y el aumento de las fronteras agrícolas, principalmente a partir de mediados del siglo XIX, intensificaron la emisión de los GEI, promoviendo un efecto invernadero adicional (Costa et al., 2008). En consecuencia, la temperatura media del planeta ha aumentado, ocasionando el fenómeno conocido como calentamiento global que presenta serias consecuencias ambientales y productivas (IPCC, 2007; 2015). Entre 1950 y 2011, las concentraciones de CO_2, CH_4 y N_2O aumentaron, respectivamente, 40, 150 y 20 % (IPCC, 2013), alcanzando niveles de 404 ppm de CO_2 (NOAA, 2017), 1803 ppb de CH_4 y 324 ppb de N_2O (IPCC, 2013).

Las estimaciones indicadas por IPCC demuestran con alta probabilidad (90 % a 99 % de probabilidad) que la mayor parte del aumento observado en la temperatura media global se debe a mayores concentraciones de GEI por acción antrópica. Muchas actividades antropogénicas son generadoras de GEI, como la quema de combustibles fósiles, deforestación, quemas y actividad agropecuaria, entre otras (IPCC, 2007; 2015). A nivel mundial, CO_2, CH_4 y N_2O contribuyen con el 60 %, 22 % y 5 % del efecto invernadero de origen antropogénico, respectivamente (Rhode, 1990; USEPA, 2006), siendo la agricultura la principal fuente de CH_4 y N_2O. Entre las actividades generadoras de GEI, se estima que la agricultura y la ganadería contribuyen en todo el mundo con, aproximadamente, el 22 % de las emisiones totales de CO_2, 55 % de las emisiones de CH_4 y 80 % de las emisiones de N_2O. Se destaca que, en los países con mayor participación de sus actividades agropecuarias en la economía, los valores pueden ser más altos (Bayer et al., 2011; Portela y Leite, 2016). De ese total, el cultivo de arroz contribuye con 30 % de las emisiones de CH_4 y 11 % de las emisiones de N_2O (IPCC, 2007).

El cultivo del arroz de riego es una actividad agrícola de gran relevancia en cuanto a la emisión de GEI, destacándose como importante fuente de CH_4. Sin embargo, todavía existe una gran incerti-

dumbre asociada con el potencial de emisión de CH_4 del cultivo de arroz, estimándose que varía entre 20 y 60 teragramo (Tg), es decir, entre el 3 % y 10 % de las emisiones globales, que suman 600 Tg (GRiSP, 2013). La mayor parte de las emisiones de CH_4 del cultivo de arroz se genera en las regiones tropicales, subtropical y en partes de la región templada, incluyendo áreas de América Latina, África y el Sudeste Asiático (Aselmann y Crutzen, 1989; Yan et al., 2005). Esta última contribuye con cerca del 90 % de las emisiones globales de CH_4, mientras que África y América del Sur lo hacen, respectivamente, con el 3,5 % y 4,7 %. En el Sudeste Asiático, China e India son los dos principales países productores de arroz. Por lo tanto, las regiones donde más se produce arroz son también aquellas en que hay mayores emisiones de CH_4 (Yan et al., 2002).

A pesar del potencial impacto ambiental negativo del cultivo de arroz, que está fuertemente asociado a la emisión de GEI y la elevada demanda y alteración en la calidad de recursos hídricos, este cultivo presenta una reconocida importancia económica y social, de forma que la reducción en su producción puede afectar, sobre todo, la seguridad alimentaria de la población y la economía de los países productores (Copetti, 2014). También hay que considerar que muchas áreas no cultivadas y naturalmente inundadas, también son fuentes de emisión de GEI, sin ofrecer producción de alimentos. De esta forma, hay un consenso junto al medio científico que los esfuerzos deben ser asumidos para optimizar la producción de arroz de forma sustentable, atendiendo a la creciente demanda de la población y minimizando su impacto sobre el medio ambiente.

Acuerdos climáticos mundiales

Desde las primeras evidencias de la relación entre el efecto invernadero de origen antrópico y el calentamiento global, mucho se ha discutido sobre el tema. Hoy en día hay prácticamente consenso en el medio científico de que habrá cambios en el clima de la Tierra a lo largo de los próximos años, sobre todo en el aumento de las emisiones de GEI (Teixeira et al., 2006). En consecuencia, se han realizado esfuerzos globales para atenuar los factores determinantes del cambio climático. Incluso con la anuencia y la participación de todas las naciones, las estrategias han sido formuladas y mejoradas para reducir las emisiones de GEI en encuentros y acuerdos climáticos internacionales.

La Conferencia de Estocolmo celebrada en 1972, organizada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), fue posiblemente la primera iniciativa dedicada a la discusión de aspectos relacionados con la sustentabilidad ambiental y la preservación de los recursos naturales. Con posterioridad a ella se han realizado otros eventos, algunos de carácter estrictamente científico y otros incluyendo agendas más amplias. Se destacan las dos primeras ediciones de la Conferencia Mundial del Clima, celebradas en 1979 y 1990. En ese período, específicamente en 1988, se creó el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Abierto a todos los países miembros de la ONU, el IPCC es un órgano que evalúa, sintetiza y divulga investigaciones científicas sobre cambio climático. En 1992 se celebró la Conferencia de la ONU sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, también conocida como ECO-92, que representa un hito histórico en el debate de la agenda medioambiental mundial, culminando con la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Con 196 países miembros, la CMNUCC entró en vigor en 1994, estableciendo un compromiso internacional y las responsabilidades de cada país en el control del calentamiento global. En consecuencia, se produjo el Mandato de Berlín (1995) y en 1997 se firmó el Protocolo de Kioto que establece un compromiso legal de reducción de emisiones de GEI a 37 países industrializados, operando las decisiones de la CMNUCC (MRE, 2019). El marco siguiente, la Segunda Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible (Río + 10), en 2002, originó una declaración endosando y actualizando las resoluciones anteriores, tratando el desarrollo sustentable de forma más amplia (Quadros, 2017).

En 2005 el Protocolo de Kioto entró en vigor, discriminando a los 192 países que lo ratificaron en dos grupos: países con metas de reducción y países sin metas de reducción (MRE, 2019). En 2008 el Protocolo de Kioto se flexibilizó, haciéndose políticamente sostenible y facilitando el cumplimiento de

las metas por las naciones participantes. Por otro lado, contemplando no sólo los países industrializados, la Declaración de Copenhague de 2009 no fue oficialmente adoptada por la CMNUCC. Ésta ha sido exitosa por la Declaración de Cancún (2010), la Plataforma de Durban (2011) y la Enmienda de Doha (2012), aún bajo la vigencia del Protocolo de Kioto. El acuerdo de París, último marco en términos de acuerdos ambientales internacionales, se firmó en 2015 con el objetivo central de fortalecer la respuesta global a la amenaza del cambio climático y la capacidad de los países para hacer frente a los impactos de estos cambios. El Acuerdo de París fue aprobado por los 195 países parte de la CMNUCC para reducir las emisiones de GEI en el contexto del desarrollo sostenible. El compromiso se produce en el sentido de mantener el aumento de la temperatura media global en mucho menos de 2 °C por encima de los niveles preindustriales y de hacer esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales (MMA, 2018). Con vigencia a partir de 2016, el Acuerdo de París tiene por objeto la participación de todas las naciones en la reducción de emisiones, alentando, además, acciones voluntarias y transparentes.

Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

La elaboración de Inventario Nacional de Emisión de GEI se constituye como una forma efectiva de monitorear, informar y verificar su evolución en los países y los progresos en el cumplimiento de las metas comprometidas en acuerdos internacionales. Este instrumento puede ser utilizado para subsidiar el desarrollo de modelos atmosféricos, auxiliar al poder público en el desarrollo de estrategias y seguimiento del progreso de políticas de reducción de emisiones, así como para el entendimiento de las fuentes y tendencias de emisiones. Los inventarios de GEI estratifican las fuentes y las eliminaciones por fuente (categoría), utilizando el concepto de Potencial de Calentamiento Global para combinar las emisiones resultantes de diferentes GEI (MMA, 2018). Para desarrollar inventarios nacionales de GEI de alta calidad y comparables entre sí, el IPCC pone a disposición, periódicamente, una serie de principios y procedimientos metodológicos para ser adoptados en las estimaciones de emisiones. La Guía del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006) proporciona indicaciones específicas para estimar las emisiones de CH_4 del cultivo de arroz, que se calculan multiplicando un factor de emisión diario por el período del cultivo y el área cosechada de arroz durante el año, considerando los regímenes hídricos vigentes en el periodos de cultivo de arroz y del barbecho (fuera de temporada), los tipos y cantidades de materia orgánica aportada al suelo, así como el momento de su incorporación (Ecuación 1) .

$$CH_{4\ arroz} = \sum_{i,j,k}(EF_{i,j,k} \cdot t_{i.j.k} \cdot A_{i,j,k} \cdot 10^{-6}) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

$CH_{4\ arroz}$ = emisiones anuales de CH_4 del cultivo de arroz, en Gg CH_4 año^{-1};

$EF_{i,j,k}$ = factor de emisión diario para las condiciones i, j y k, en kg CH_4 ha^{-1} d^{-1};

$t_{i,j,k}$ = período de crecimiento del arroz para las condiciones i, j y k, en días;

$A_{i,j,k}$ = área de arroz cosechada anualmente, para las condiciones i, j y k, en ha año^{-1};

i, j y k = representan los diferentes ecosistemas, regímenes de gestión del agua, tipo y cantidad de material orgánico y otras condiciones que pueden influir en las emisiones de CH_4 del cultivo de arroz.

El factor de emisión de CH_4 diario (EFi) se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.

$$EF_i = EF_c \cdot SF_w \cdot SF_p \cdot SF_o \cdot SF_{s,r} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

EF_i = factor de emisión diario para un área cosechada determinada, en kg CH_4 ha^{-1} d^{-1};

EF_c = factor de emisión de línea base para áreas de cultivo de arroz regado con inundación continua, sin entrada de material orgánico en kg CH_4 ha^{-1} d^{-1};

SF_w = factor de escala que explica las diferencias en el régimen hídrico durante el período de cultivo del arroz;

SF_p = factor de escala que explica las diferencias en el régimen hídrico en el período anterior al cultivo del arroz (entre temporadas);

SF_o = factor de escala que explica las variaciones en el tipo y cantidad de material orgánico aportado al suelo;

$SF_{s,r}$ = factor de escala para el tipo de suelo, variedades de arroz, etc., si está disponible.

De acuerdo con las directrices de la Guía del IPCC (IPCC, 2006), el factor de emisión de línea base para las áreas de cultivo de arroz regado por inundación continua sin aporte de material orgánico (EF_c) debe, preferentemente, ser determinado localmente en experimentos con evaluación de las emisiones de CH_4. En ausencia de factores de emisión validados, el IPCC recomienda utilizar el valor indicado por defecto (1,3 kg CH_4 ha^{-1} d^{-1}), que asume la ausencia de aporte de materia orgánica y la mantención del suelo inundado por un período inferior a 180 d, en el período que antecede el cultivo del arroz. El factor de escala SF_w explica las diferencias en el régimen hídrico durante el período de cultivo del arroz. La metodología del IPCC (2006) propone valores de referencia para el factor de escala SF_w desagregados por el régimen hídrico para usar en el cálculo de las estimaciones de las emisiones de CH_4 del cultivo de arroz (Cuadro 1).

Cuadro 1. Factores de escala por defecto, para estimar las emisiones de CH_4 en función del régimen hídrico durante el período de cultivo del arroz, utilizando el sistema de riego por inundación continuo (SF_w) como referencia.

Régimen hídrico		**Agregado**		**Desagregado**	
Ecosistema	**Gestión del agua**	**Factor de escala SF_w**	**Error estándar**	**Factor de escala SF_w**	**Error estándar**
Tierras altas / Tierras de secano[1]		0	-	0	-
Tierras bajas/ de regadío[2]	Inundación continua	0,78	0,62 - 0,98	1,00	0,79 - 1,26
	Inundación intermitente c/ aireación simple			0,60	0,46 – 0,80
	Inundación intermitente c/ aireación múltiple			0,52	0,41 – 0,66
Impulsado por lluvias y aguas profundas[3]	Lluvias regulares	0,27	0,21 – 0,34	0,28	0,21 – 0,37
	Sujeta a sequía			0,25	0,18 – 0,36
	Aguas profundas			0,31	ND

Fuente: Yan et al. (2005). Adaptado de IPCC (2006).

[1] Áreas de cultivo sin inundación por un período significativo.

[2] Áreas de cultivo inundadas durante un período significativo y régimen hídrico controlado: inundación continua (sólo drenado para la cosecha), inundaciones intermitentes (con al menos, un período de aireación mayor a tres días durante el cultivo), aireación simple (con un período de aireación, en cualquier etapa del cultivo, excepto el drenaje para la cosecha) y aireación múltiple (con más de un período de aireación en cualquier etapa del cultivo, excepto drenaje para la cosecha).

[3] Áreas de cultivo inundadas por un período significativo y régimen hídrico dependiente de la lluvia: lluvias regulares (el nivel del agua puede aumentar hasta 50 cm durante el cultivo), sujeto a sequía (sujetas a períodos de sequía durante el cultivo) y aguas profundas (el nivel del agua puede aumentar en más de 50 cm durante un período significativo del cultivo).

Otro aspecto considerado en el establecimiento del factor de emisión de CH_4 para el cultivo de arroz, es el régimen hídrico adoptado en el período anterior al cultivo, es decir, fuera de temporada, que caracteriza el factor de escala SRp, para el cual la metodología del IPCC (2006) considera tres tipos de regímenes hídricos: 1) áreas no inundadas durante la temporada baja durante menos de 180 d; 2) áreas no inundadas fuera de temporada por más de 180 d; y 3) áreas inundadas fuera de temporada por más de 30 d (Cuadro 2).

Cuadro 2. Factores de la escala predeterminada para estimar las emisiones de CH_4 en función del régimen hídrico durante el período anterior al cultivo del arroz (o fuera de temporada) (SFp).

Régimen hídrico anterior al cultivo de arroz	**Agregado**		**Desagregado**	
	Factor de escala SFp	**Error estándar**	**Factor de escala SFp**	**Error estándar**
Áreas no inundadas fuera de temporada por un período <180 d	1,22	1,07 – 1,40	1,00	0,88 – 1,14
Áreas no inundadas fuera de temporada por un período >180 d			0,68	0,58 – 0,80
Áreas inundadas fuera de temporada por un período >30 d			1,90	1,65 – 2,18

Fuente: Yan et al. (2005). Adaptado de IPCC (2006).

Un tercer factor de escala necesario para establecer el factor de emisión de CH_4 para el cultivo de arroz (EFi), considera el aporte de materia orgánica al suelo (SFo), que se determina a partir de la Ecuación 3.

$$SF_o = (1 + \sum_i ROA_i \cdot CFOA_i)^{0,59} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

SFo = factor de escala que explica las variaciones en el tipo y cantidad de material orgánico aplicado;

ROAi = dosis de materia orgánica aplicada, basada en materia seca para paja de arroz y materia fresca para otros residuos, en t ha^{-1};

CFOAi = factor de conversión para el aporte de materia orgánica, teniendo como referencia el efecto que proporciona la aplicación de paja de arroz inmediatamente antes del cultivo.

El IPCC (2006) propone el uso del factor de conversión CFOAi predeterminado, para diferentes tipos de material orgánico agregado al suelo. Específicamente para la paja de arroz, los valores indicados varían según el tiempo de incorporación al suelo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Factores de conversión predeterminados para tipos de material orgánico (CFOA).

Material orgánico	Factor de conversión (CFOA)	Error estándar
Paja de arroz incorporada al suelo menos de 30 d antes del cultivo	1,00	0,97 – 1,04
Paja de arroz incorporada al suelo más de 30 d antes del cultivo	0,29	0,20 – 0,40
Compostaje	0,05	0,01 – 0,08
Estiércol animal	0,14	0,07 - 0,20
Abono verde	0,50	0,30 – 0,60

Fuente: Yan et al. (2005). Adaptado de IPCC (2006).

Cambios provocados por la inundación del suelo relacionados con producción y emisión de CH_4 y N_2O

La emisión de N_2O y CH_4 en áreas inundadas del cultivo de arroz, es el resultado de complejas interacciones entre las plantas de arroz, microorganismos y el suelo. En ambientes inundados existe, predominantemente, una actividad anaeróbica en el suelo, debido a la presencia de una lámina de agua que determina la ausencia de oxígeno libre (O_2) (Silva et al., 2008). La inundación del suelo, durante el período de cultivo, causa la disminución de la concentración de O_2, debido a la baja tasa de difusión del O_2 en el agua, siendo consumido rápidamente en función de la necesidad de energía de los microorganismos aeróbicos que implican la transferencia de electrones al O_2. En la ausencia de oxígeno, otros iones funcionarán como aceptores en la cadena transportadora de electrones ligada a la respiración de los microorganismos y producción de energía (Le Mer y Roger, 2001).

El primer compuesto a ser utilizado como aceptor de electrones después de la desaparición del O_2 es el nitrato (NO_3^-), proveniente de la descomposición de la materia orgánica o de la adición de N a través de fertilización, nitrificado anteriormente a la inundación o en zonas aeróbicas del suelo. La reducción del NO_3^- en los suelos inundados produce el N_2O; sin embargo, su producción está restringida al curso de las reacciones de reducción y a la disponibilidad de NO_3^- en el suelo. Los siguientes compuestos a ser reducidos son los óxidos de Mn^{+4}, seguido de los óxidos de Fe^{+3}, SO_4^{-2} y del CO_2. Con el agotamiento de los compuestos inorgánicos como aceptores de electrones, se desencadena el proceso en el cual las bacterias anaeróbicas metanogénicas utilizan los compuestos orgánicos como aceptores de electrones (compuestos orgánicos con pocos C) transformándolos en CH_4 y CO_2 (Silva et al., 2008). Un esquema de los cambios electroquímicos y las emisiones de N_2O y CH_4 en función de la inundación se muestra en la Figura 1.

La descomposición anaeróbica en suelos inundados ocurre en etapas, involucrando diversos grupos de microorganismos en la degradación de los compuestos orgánicos. Inicialmente, los microorganismos necesitan transformar las moléculas compuestas (varias cadenas de C) en formas simples (moléculas con pocos C); es decir, inicia la hidrólisis de macromoléculas (lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) a monómeros (aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, glicerol y nucleótidos) por microorganismos aeróbicos o anaeróbicos facultativos y estrictos (Moreira y Siqueira, 2002). A partir de monómeros, los microorganismos anaeróbicos facultativos producen ácidos orgánicos, como acético, propiónico y butírico por medio de la fermentación que, posteriormente, se convierten a acetato y H_2/CO_2, utilizados por las bacterias metanogénicas para la producción de CH_4 (Dubey, 2005). Las bacterias que producen CH_4 pertenecen a los géneros *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter, Methanococcus* y *Methanosarcina*, siendo los géneros

Methanobacterium y *Methanosarcina* los que se asocian a la producción de CH_4 en el cultivo del arroz de riego, de forma que estas bacterias son estrictamente anaeróbicas y necesitan potencial redox (Eh) de aproximadamente -200 mV para reducir el C y producir CH_4 (Dubey, 2005). La fermentación es la principal vía de producción del CH_4 en suelos inundados. Pero el metano puede ser formado, también, por reducción del gas carbónico (Ecuación 4). En la escala de reducción de los compuestos inorgánicos del suelo, el CO_2 se reduce después del SO_4^{-2}, necesitando, por lo tanto, de potencial de oxidorreducción muy bajos.

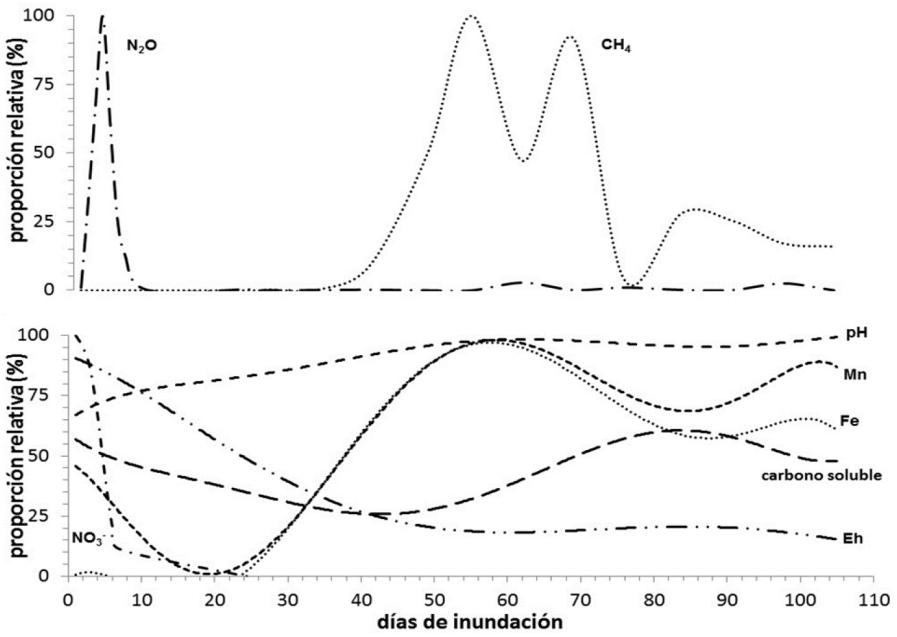


Figura 1. Representación esquemática de las alteraciones electroquímicas resultantes de la inundación del suelo y el flujo de las emisiones de N_2O y CH_4 (Adaptado: Copetti, 2014).

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad \text{(Ecuación 4)}$$

El inicio de la producción de CH_4 depende de la cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable y de la magnitud del sistema redox después de la reducción del Fe^{+3} y del SO_4^{-2}, de modo que la disponibilidad de sustratos (H_2 y acetato) en el suelo es el factor que limita la actividad de las bacterias metanogénicas. Estas bacterias todavía tienen que competir con otras bacterias anaeróbicas por los sustratos disponibles, tales como las bacterias reductoras de Fe^{+3}, SO_4^{-2} y Mn^{+4} (Dubey, 2005; Moterle, 2011). Después del inicio del flujo de CH_4 en el cultivo del arroz, las tasas y picos de emisión también dependen de la disponibilidad de sustratos a las bacterias. En este sentido, Itoh et al. (2011) verificaron que la remoción de toda la paja de arroz del suelo postergó la emisión de CH_4, la cual ocurrió apenas a partir del florecimiento del cultivo, estando asociada a la elevada disponibilidad de carbono orgánico proveniente de los exudados radiculares.

El flujo de CH_4 a la atmósfera es controlado por el gradiente de concentración entre el suelo inundado y la atmósfera, a través de tres mecanismos de transporte: por el sistema vascular de las plantas, por difusión a través del suelo y lámina de agua, y por la formación de burbujas de gas que escapan a la atmósfera (Conrad, 2002). Entre los tres mecanismos, el más importante es el

flujo de CH_4 controlado por el sistema vascular de las plantas que se encuentran en el ambiente inundado, funcionando como una verdadera válvula de escape del gas. Una representación de los procesos que involucra la producción y difusión del CH_4 a la atmósfera se presenta en la Figura 2.

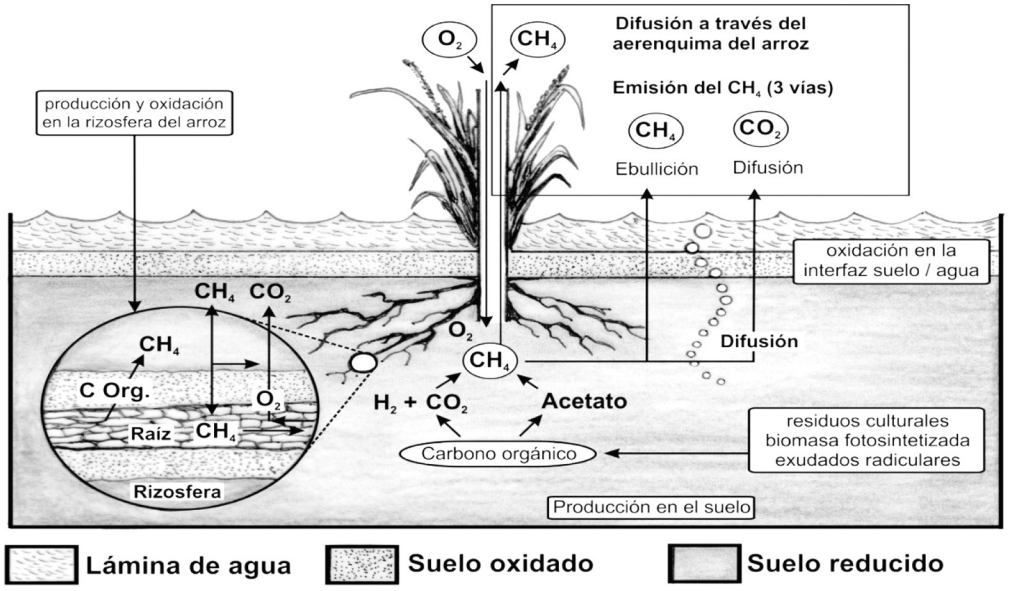


Figura 2. Esquema que representa el ambiente de suelo inundado para el cultivo del arroz y los procesos que involucra la producción y difusión del metano a la atmósfera (Adaptado: Silva et al., 2008).

Por lo tanto, la producción de CH_4 ocurre por la asociación de factores relacionados con el cultivo de arroz irrigado por inundación, la existencia de una fuente de sustrato disponible para las bacterias metanogénicas (compuestos conteniendo C) y la condición ambiental favorable para la actividad de las bacterias (ambiente anaeróbico). Diversos factores pueden influenciar el flujo de CH_4 en suelos agrícolas inundados, destacándose la actividad microbiana, temperatura del suelo, pH y Eh del medio, disponibilidad de sustratos, propiedades físicas y químicas del suelo, actividades de enzimas, concentraciones de H_2, NH_3, NO_3^-, NO_2^- y SO_4^{-2}, difusión y transferencia de CH_4, desarrollo de las plantas de arroz en lo que se refiere al aspecto nutricional y la producción de fitomasa aérea y radicular, así como la forma de distribución del sistema radicular en el perfil del producto (Costa, 2005). Además, se destaca que una parte del CH_4 producido en el suelo inundado puede ser oxidado a CO_2 por microorganismos metanotróficos presentes en regiones del suelo que permanecen oxidadas, como la rizósfera del arroz y la superficie del suelo. Así, la cantidad emitida de CH_4 es el resultado neto de la cantidad producida y de la cantidad que se genera en regiones oxidadas de la rizósfera bajo condiciones inundadas.

Por su parte, la producción de N_2O está relacionada con la mineralización del nitrógeno en el suelo, principalmente a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación. El N orgánico es mineralizado a amonio, que a continuación sufre nitrificación produciendo nitrato por la actividad de bacterias aeróbicas. En suelos bien oxidados la forma estable del N inorgánico es el nitrato. Sin embargo, cuando el suelo es inundado y el O_2 es consumido, los microorganismos anaeróbicos

utilizan el nitrato como receptor de electrones, reduciéndolos a N_2, en un proceso denominado de desnitrificación, donde el NO y N_2O son producidos como compuestos intermediarios, siendo liberados al ambiente. Los procesos de amonificación, nitrificación y desnitrificación están relacionados, ya que el producto de un proceso es requerido por el siguiente.

En ambientes estrictamente anaeróbicos ocurre una acumulación de amonio, pues la ausencia de oxígeno no permite la actividad de las bacterias nitrificadoras. Sin embargo, en zonas oxidadas, como la superficie de suelos inundados y la rizósfera, la actividad de las bacterias nitrificadoras produce nitrato que, al difundir hacia zonas reducidas, puede ser desnitrificado produciendo N_2O (Figura 3). No obstante, el proceso de desnitrificación se intensifica cuando ocurre la alternancia de las condiciones oxidadas y reducidas, o cuando se realiza la fertilización nitrogenada, produciendo mayores cantidades de N_2O.

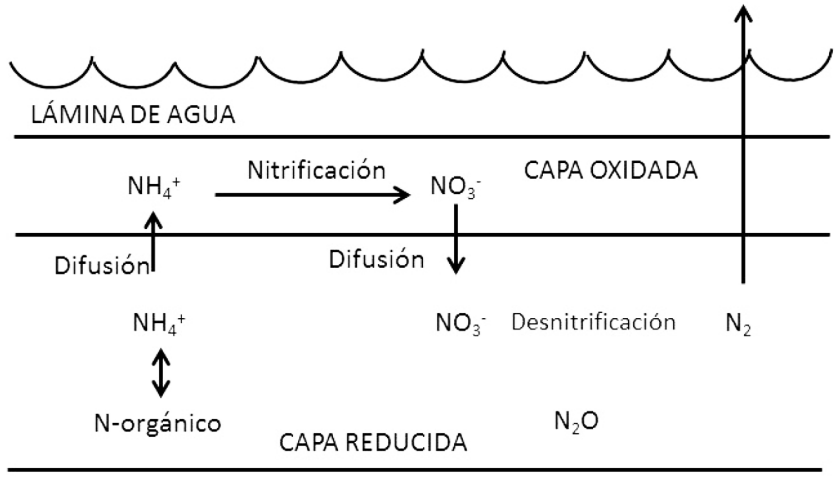


Figura 3. Esquema demostrando los procesos de nitrificación y desnitrificación en ambientes inundados (Adaptado: Sousa et al., 2012).

En este contexto, varios factores pueden controlar las emisiones de GEI en cultivos de arroz irrigado por inundación, muchos de los cuales pueden ser afectados por las prácticas de manejo del cultivo, como la irrigación y fertilización, entre otras. Así, el conocimiento de los mecanismos involucrados y la adopción de ciertas prácticas pueden ser estrategias importantes para garantizar la productividad del arroz y reducir su contribución a la emisión de GEI.

Emisiones indirectas de N_2O

Otra vía importante de pérdida de nitrógeno desde los fertilizantes en el suelo es la volatilización del amoníaco (NH_3) (Ma et al., 2010). Es la forma más reducida de nitrógeno reactivo presente en la atmósfera, cuya concentración ha crecido debido a la actividad humana (Aneja et al., 2003). La agricultura representa entre el 20 % y el 80 % de las emisiones de N-NH_3 en las áreas agrícolas (Misselbrook et al., 2000; Aneja et al., 2008).

A los efectos de contabilizar las emisiones de GEI, el amoniaco se considera una fuente indirecta de N_2O, ya que una fracción de los fertilizantes aplicados al suelo se volatiliza como NH_3 y, posteriormente, se vuelve a depositar en el suelo (IPCC, 1996; Alves, 2015).

La volatilización del amoniaco está fuertemente asociada al uso de urea, una de las principales fuentes de N del arroz de regadío, debido al alto contenido de N y al menor costo por unidad del

nutriente aplicado. A pesar de estos aspectos favorables, este fertilizante presenta una reacción alcalina inicial en el suelo, favoreciendo las pérdidas de N como NH_3, cuando se aplica en superficie. Además de la actividad de la ureasa, enzima que controla la tasa de hidrólisis de la urea en el suelo, la intensidad de las pérdidas de NH_3 está influenciada por la interacción de factores edáficos y ambientales, siendo proporcional a la concentración de amoniaco en la solución del suelo (Anjos y Tedesco, 1976; Xu et al., 1993).

Estrategias de adaptación y mitigación de las emisiones de GEI

Adaptación de la agricultura al cambio climático: cultivo de arroz de riego

Las emisiones antrópicas de GEI y los cambios de uso y cobertura de la tierra (Scott et al., 2018) podrían alterar el clima global en las próximas décadas. Por ejemplo, se espera como resultado de las actividades antrópicas aumentos de la temperatura media global del aire, del nivel medio del mar y de la frecuencia e intensidad de precipitaciones y sequías, ocasionando inundaciones y olas de calor (Stocker et al., 2013). Tales cambios podrían impactar significativamente diversos agroecosistemas en todo el mundo (Stevanović et al., 2016).

Desde el punto de vista estratégico, será de extrema importancia predecir de qué manera los agroecosistemas atenderán al aumento de la demanda mundial por alimentos, fibras y energía de modo sostenible y en un contexto en el cual la productividad agrícola pueda presentar estancamiento o reducciones asociadas al cambio climático (Zhao et al., 2018). La variabilidad climática es responsable de, aproximadamente, un tercio de las oscilaciones de la productividad agrícola en todo el mundo (Ray et al., 2015). Los cambios climáticos podrían, por lo tanto, disminuir la variabilidad de la productividad agrícola drásticamente a lo largo de la segunda mitad de este siglo, en ausencia de medidas de adaptación y mitigación de las emisiones de GEI.

El 5º Informe de Evaluación (AR5) del IPCC sugiere que la productividad del arroz producido en la región tropical, probablemente, disminuirá a una tasa de entre 1,3 % y 3,5 % por cada 1 °C de calentamiento medio global (Porter et al., 2014). El aumento de la temperatura media global puede elevar la ocurrencia de tensiones térmicas e hídricas y, como consecuencia, disminuir la productividad (Zhao et al., 2018). Se estima que los cambios climáticos ya están reduciendo la producción agrícola global de 1 % a 5 % por década en los últimos 30 años y seguirán representando desafíos para la agricultura en las próximas décadas (Porter et al., 2014). Existe evidencia de que los cambios climáticos están afectando la producción de arroz en la región tropical. En Asia, específicamente en Indonesia, se espera un retraso en el inicio de las precipitaciones (monzones) a partir de 2050. Debido a esto, se espera un aumento de la deficiencia hídrica (Naylor et al., 2007). Actualmente, hay un área amplia del continente asiático con temperaturas superiores a 33 °C, umbral crítico para el cultivo del arroz, como el sur y el sudeste de Asia, en China central y en pequeñas áreas insulares del Sudeste Asiático. Las temperaturas superiores a 36 °C se producen en el continente subindustrial y en las partes de Myanmar y Tailandia (Wassmann et al., 2009). Una situación similar también se encuentra en la región de producción del arroz tropical en Brasil, principalmente en los estados de Piauí y Maranhão. Para el arroz de tierras altas, cultivado principalmente en la región central de Brasil, se espera una reducción en la productividad variando de 200 a 600 kg ha^{-1} (hasta 20 %) para toda la región de producción en 2050. Esa reducción en la productividad está relacionada a los cambios en la intensidad y frecuencia de los patrones de deficiencia hídrica, debido al cambio climático (Ramirez-Villegas et al., 2018).

En la región subtropical de Brasil, las principales alteraciones en la producción de arroz están asociadas a: a) riesgo de frío; b) acortamiento del ciclo debido al aumento de la temperatura; c) aumento de productividad en las regiones más frías, con menores pérdidas derivadas de la esterilidad por frío; d) en las regiones más calientes los cambios climáticos deben llevar a una dismi-

nución de la productividad para algunas épocas de siembra y variedades debido a la elevación de las temperaturas diurnas y nocturnas (Steinmetz et al., 2005; Cuadra et al., 2015).

En este contexto, el desarrollo y aplicación de tecnologías, productos y servicios para minimizar los riesgos de pérdidas e incrementar las ganancias de productividad de los agroecosistemas, serán fundamentales para la adaptación de los cultivos agrícolas al cambio climático. Entre estas tecnologías se destaca el aumento de inversión para almacenar agua, programas de mejoramiento vegetal, diversificación de cultivos y sistemas de predicción de tormentas, etc. Los programas de mejoramiento vegetal desempeñarán un importante papel en la adaptación de los cultivos al cambio climático, mediante el desarrollo de nuevos materiales genéticos adaptados a los ambientes de producción, tolerantes a la deficiencia hídrica. Los cultivos alternativos deben ser estudiados en los lugares donde los actuales sistemas de producción se están volviendo menos sostenibles. Diversos grupos de investigación han concentrado esfuerzos en la búsqueda de avances del conocimiento para el desarrollo de variedades con mayor tolerancia a los estreses de tipos bióticos y abióticos. Las diversas líneas de investigación buscan alternativas, como la exploración de la variabilidad genética de los cultivos y de especies relacionadas, para la identificación de marcadores moleculares asociados a regiones genómicas (quantitative trait locus o QTLs) o alelos favorables para selección asistida, selección genómica amplia, incorporación de caracteres exóticos mediante la transformación genética, o por medio de la edición génica. La identificación de genes de plantas tolerantes, como algunas especies nativas semiáridas que sobreviven en situaciones de estrés hídrico y altas temperaturas, podrán contribuir en la generación de alternativas biotecnológicas para el mejoramiento de plantas cultivadas (Aidar et al., 2017).

En el caso de las variedades más adaptadas, la adopción de buenas prácticas agropecuarias se considera un método viable de proveer resiliencia y minimizar la exposición a los riesgos climáticos, posibilitando reducir las actuales lagunas de productividad (Cassman, 1999; Ittersum et al., 2016). La Zonificación Agrícola de Riesgo Climático (ZARC) contribuye a reducir los riesgos por medio de la recomendación de épocas más favorables para la implantación de diversos cultivos agrícolas (Santos et al., 2010).

Otro factor de gran impacto en la productividad de los cultivos en las próximas décadas será el efecto del incremento de la presión parcial del CO_2 atmosférico sobre la fotosíntesis de las plantas, sobre todo de aquellas con metabolismo C_3 (por ejemplo, trigo, arroz y soja), pero también sobre el valor nutricional de los alimentos de base vegetal. Los resultados recientes han indicado que los cultivos C_3, no leguminosas, tienen concentraciones más bajas de proteína cuando se cultivan en un ambiente con una concentración de CO_2 elevada, mientras que los cultivos C_4 parecen ser menos afectados (Myers et al., 2014). Para el cultivo del arroz de riego, Cuadra et al. (2015) indicaron que el exceso de CO_2 atmosférico, considerando ese efecto aislado, puede eventualmente beneficiar la productividad de arroz de riego en el estado de Rio Grande do Sul, principal estado productor de Brasil.

Por último, se resalta que los cambios climáticos afectarán los estreses de orden abiótico y biótico, intensificándolos. Por ello, es de extrema importancia estimar cómo los problemas fitosanitarios pueden ser impactados por los cambios en el clima, ya que patógenos y plagas son factores responsables por drásticas reducciones de productividad y pueden poner en riesgo la sostenibilidad económica y ambiental de diversas actividades agrícolas. Por lo tanto, los cambios climáticos representan un riesgo muy elevado para la seguridad alimentaria, aún sin medidas adecuadas de mitigación y adaptación de los agroecosistemas (Magrin et al., 2014). Es consenso, que la promoción de la resiliencia y la adaptabilidad a los riesgos climáticos requiere planificación y el desarrollo de recursos humanos, además de herramientas tecnológicas capaces de producir conocimiento y estimaciones de los riesgos a que están sujetos los distintos sistemas de producción en las diferentes regiones.

Mitigación de las emisiones de GEI: cultivo de arroz

Como se ha señalado, las emisiones de GEI del cultivo de arroz de riego están influenciadas por la interacción de diversos procesos que involucra microorganismos metanogénicos y metanotróficos, la presencia y el tipo de vegetación, propiedades físico-químicas del suelo, condiciones climáticas (Le Mer y Roger, 2001), y las prácticas de manejo del cultivo. Las modificaciones en el manejo también ofrecen importantes oportunidades de mitigación. A menudo, una misma práctica influye más de un gas simultáneamente, por diferentes mecanismos, algunas veces con efecto antagónico, de forma que el beneficio neto de la alteración en el manejo debe considerar el efecto conjunto sobre todos los GEI (Schils et al., 2005). Entre las opciones de manejo con potencial mitigador de emisiones de GEI para el cultivo del arroz, destacan el manejo del agua, preparación del suelo, incorporación de paja y residuos, manejo de fertilizantes, diversificación de cultivos y la selección de variedades (Hussain et al., 2015). Hay que considerar, además, que algunas prácticas de manejo, a pesar del efecto mitigador de emisiones, son menos viables por comprometer la productividad del área cultivada.

Manejo del agua de riego

El manejo del agua, es decir, el patrón de riego, es un factor preponderante en el control de emisiones de GEI en el arroz. Existen diversas opciones o modalidades de manejo del agua, involucrando básicamente la intermitencia de la irrigación o drenaje del suelo para reducir las emisiones de GEI, en comparación con el sistema tradicional de riego por inundación continua, pudiendo ser adoptados bajo diferentes condiciones de suelo y clima, sin comprometer el potencial productivo del arroz (Hussain et al., 2015). El CH_4, que responde por la mayor parte del potencial de calentamiento global del cultivo de arroz, es el gas más fuertemente influenciado por la variación en el manejo del riego, ya que la metanogénesis está directamente asociada a la condición de inundación del suelo durante el cultivo. Además, el crecimiento y actividad radicular también interfieren en la emisión de CH_4, dado que la planta de arroz es una importante vía de transporte pasivo del CH_4 producido en el suelo a la atmósfera (Ko y Kang, 2000), a través del aerénquima y microporos localizados en las hojas (Nouchi et al., 1994). Chirinda et al. (2018) reportaron reducciones de entre 50 % y 90 % en las emisiones de CH_4 derivadas de la adopción de manejos alternativos del riego en relación a la inundación continua.

La intermitencia del riego, así como el drenaje libre del suelo en diferentes momentos del ciclo del arroz, mitigan las emisiones de CH_4 por promover la oxidación del suelo. La presencia de oxígeno elimina la actividad de los metanogénicos, que son microorganismos anaeróbicos estrictos y, consecuentemente, interrumpe la producción de CH_4 (Sass et al., 1992). Además, la entrada de O_2 oxida los compuestos inorgánicos anteriormente reducidos en el suelo, permitiendo, además, que un grupo específico de bacterias aeróbicas (metanotróficas) oxiden el CH_4 presente, produciendo CO_2. En consecuencia, hay una reducción en las emisiones de CH_4 en el arroz de riego (Wassmann et al., 2000). Este efecto puede ocurrir incluso en condiciones de suelo inundado, ya que hay entrada de oxígeno en la rizósfera vía aerénquima de las plantas de arroz.

La velocidad de oxidación del suelo, en respuesta a las prácticas de disminución del riego o drenaje, varía ampliamente en función de las características del suelo, pudiendo llevar desde pocos días a incluso semanas (Le Mer y Roger, 2001). El tiempo para la oxidación del suelo varía, además, con el estado de desarrollo de la planta de arroz, cantidad de iones inorgánicos aceptores de electrones presentes en el suelo, altura de la capa freática, precipitación durante el período oxidado, sistematización del suelo, condiciones climáticas y la evapotranspiración (Wang et al., 1999). Según Sass et al. (1992), el mantenimiento del suelo drenado por 2 d es suficiente para provocar cambios en el nivel de reducción del suelo y disminución de las emisiones de CH_4. Para Mishra et al. (1997), este efecto se obtuvo sólo 6 d después del drenaje, cuando el contenido de agua del suelo alcanzó la capacidad de campo. Por su parte, Hou et al. (2000), en un experimento realizado

en suelo que contenía 63 % de arena, verificaron que los valores de Hartree (Eh) pasaron de -100 millivoltios (mV) durante la inundación, a +200 mV apenas 3 d después del drenaje. De la misma forma, el intervalo necesario para que el suelo alcance la condición de reducción anterior al drenaje, varía con el tipo suelo, pudiendo llevar hasta tres semanas, según lo relatado por Sass et al. (1992). Según estos autores, la práctica de drenaje del suelo por 2 a 3 d, espaciada cada 21 d, sería suficiente para minimizar los efectos de la reducción del suelo y reducir el flujo de CH_4. Se resalta que, en la fase inicial de aireación del suelo, la emisión de CH_4 puede ser intensificada por un período corto, debido a la liberación del CH_4 atrapado en el suelo; en consecuencia, las emisiones son persistentemente bajas, incluso cuando el cultivo es nuevamente inundado (Bloom, 2012).

Es importante considerar, también, que los manejos alternativos del agua para el arroz, involucrando períodos de suelo oxidado normalmente, se practican para ahorrar agua, resultando en reducción de emisión de CH_4 (Epule et al., 2011). Sin embargo, se debe prestar especial atención al suministro de las exigencias hídricas de la planta de arroz, para no comprometer el desempeño productivo del cultivo. Los resultados de la investigación muestran que hasta la fase de pre-floración, la planta de arroz es menos sensible al déficit hídrico, mientras que en las fases de floración y llenado de los granos la sensibilidad al estrés es mayor (Wassmann et al., 1993). Por esta razón, la definición del patrón de riego a ser utilizado en cada condición de cultivo, debe tener en cuenta la demanda hídrica del cultivo en las diferentes fases de desarrollo, así como la variabilidad ambiental y las variedades de arroz. La tendencia general es que el establecimiento de períodos de suelo aireado, para contener las emisiones de CH_4, a menudo resultan en aumento de los procesos de nitrificación y desnitrificación, con pérdida neta de nitrógeno (Cai et al., 1997; Zou et al., 2005). Así, para reducir simultáneamente las emisiones de CH_4 y N_2O y, consecuentemente, el potencial de calentamiento global asociado al cultivo de arroz, tanto el manejo del agua y del nitrógeno deben ser optimizados (Logomarsino et al., 2016).

Preparación del suelo y manejo de residuos

Las prácticas de preparación del suelo también tienen un potencial mitigador de emisiones de GEI en el cultivo del arroz. Los efectos principales están asociados a cambios en propiedades del suelo (porosidad, temperatura, humedad, etc.), así como a procesos bioquímicos (Li et al., 2013). Sin embargo, las alteraciones resultantes de la preparación del suelo pueden aumentar las emisiones, favoreciendo la aireación y promoviendo la ruptura de agregados del suelo, liberando fracciones protegidas de carbono orgánico (Jacinthe y Lal, 2005).

Con respecto al CO_2, las operaciones de preparación favorecen la aireación y, consecuentemente, aceleran la oxidación del carbono del suelo. Propician, además, la exposición de fracciones de la materia orgánica protegidas en los agregados al ataque microbiano. Contrariamente, la preparación reducida disminuye los cambios en el suelo, con la consiguiente reducción en las emisiones (Hussain et al., 2015). También las emisiones de CH_4 en el cultivo de arroz son generalmente mayores bajo preparación convencional, en relación a la preparación reducida o siembra directa. Para Bayer et al. (2014), este efecto está asociado, preponderantemente, a la incorporación de biomasa vegetal al suelo, promoviendo un aumento de la concentración de carbono orgánico disuelto en las capas subsuperficiales del suelo, donde la condición de reducción es más intensa. Pandey et al. (2012) atribuyen las menores emisiones de CH_4 bajo siembra directa al aumento de la densidad del suelo, resultando en menor volumen de macroporos y, por lo tanto, menor descomposición de la materia orgánica. Los datos de investigación sugieren, además, que la compactación del suelo en áreas bajo siembra directa, aumenta el tiempo de residencia del CH_4 en el suelo y, por lo tanto, la probabilidad de ser oxidado por bacterias metanotróficas, con la consecuente reducción en las emisiones por las plantas de arroz (Li et al., 2013).

Los resultados de investigaciones sobre el efecto de la preparación del suelo sobre las emisiones de N_2O en suelos cultivados con arroz de riego, todavía son contradictorios. En la mayoría de los

casos se observó un aumento en la concentración de N_2O en las preparaciones convencionales *vs*. siembra directa cero labranza (Bayer et al., 2014). Otro autor reportó mayores emisiones de N_2O bajo siembra directa con cero labranza en compración con la preparación de suelo convencional (Ahmad et al., 2009). En general, los autores atribuyen las mayores emisiones de N_2O bajo siembra directa a la mayor exposición de los fertilizantes nitrogenados que se aplican superficialmente, intensificando el proceso de nitrificación y, también, a la mayor desnitrificación debido al aumento de densidad del suelo y consecuente aumento de la anaerobiosis en la capa superficial del suelo. Contrariamente, algunos estudios reportan reducción en las emisiones de N_2O bajo siembra directa (Six et al., 2004). Así mismo, estos autores indican que la mitigación en las emisiones de N_2O bajo siembra directa depende del período de conversión para la siembra directa y de las condiciones climáticas, siendo más intensa en regiones húmedas que en aquellas con sequía.

La época y las labores de preparación del suelo y manejo de la cobertura vegetal también determinan distintos potenciales de incorporación de C y N al suelo y de emisión de GEI en el período de cultivo del arroz y también durante la temporada (Yao et al., 2010). Esto porque, en el sistema de preparación convencional (primavera), la paja remanente del cultivo de arroz y la cobertura vegetal desarrollada durante el período de otoño/invierno se incorporan al suelo con pequeña antelación de la siembra del arroz, actuando como una fuente de carbono lábil para la producción de CH_4, cuando el suelo es inundado. Por otro lado, con la anticipación de la preparación, el movimiento del suelo y la incorporación de la paja del arroz ocurren en el otoño, posibilitando que gran parte de los residuos vegetales sea descompuesta bajo condiciones aeróbicas, liberando CO_2, y disminuyendo el potencial de emisión de CH_4 del suelo, ya que la inundación para el próximo cultivo de arroz ocurre sólo en la primavera (Bayer et al., 2013). En un estudio de larga duración realizado en la región subtropical húmeda de Brasil, Bayer et al. (2015) determinaron que la preparación anticipada del suelo en el otoño redujo en 25 % el potencial de calentamiento global (PAG) debido al arroz, en relación a la preparación convencional en primavera. Las variaciones en el PAG estuvieron asociadas a la reducción en las emisiones de CH_4, no habiendo un efecto de la época de preparación del suelo sobre las emisiones de N_2O.

El aporte de material/residuos orgánicos al suelo es un factor de gran relevancia en cuanto a las emisiones de GEI en el cultivo de arroz. El uso de acondicionadores de suelo conteniendo material orgánico, como la paja de arroz y otros restos de cultivo, abonos verdes y compuestos orgánicos, promueven la producción y emisión de CH_4, dado que son una fuente de carbono lábil (Neue et al., 1996). La intensidad del efecto varía, entretanto, en función de la cantidad, calidad e incluso de la época de aplicación de los residuos (Denier van der Gon y Neue, 1995). En general, mayores emisiones de CH_4 están asociadas a la incorporación de residuos frescos, mientras que la aplicación de materiales compostados, con mayor grado de humificación, reduce las emisiones (Yan et al., 2005). Para el N_2O, el comportamiento observado normalmente es distinto, es decir, las emisiones son inhibidas por la aplicación de material orgánico, debido a la inmovilización microbiana del nitrógeno, ya que hay gran disponibilidad de carbono soluble (Ma et al., 2009).

Manejo de fertilizantes nitrogenados

La aplicación de fertilizantes nitrogenados se considera una de las principales fuentes de emisión de N_2O del suelo agrícola a la atmósfera. La urea, por ejemplo, es el fertilizante nitrogenado más importante entre los utilizados mundialmente, como resultado de la alta concentración del nutriente y el menor precio por unidad de N. Sin embargo, dada su alta solubilidad, presenta alta susceptibilidad a procesos de pérdidas de N en el suelo y un potencial de elevar las emisiones de N_2O. Esto es particularmente importante en el cultivo del arroz de riego, pues el N disponible de la urea puede abastecer los procesos de nitrificación y desnitrificación, generando N_2O como fue discutido anteriormente. En la mayoría de los casos se observó un aumento de las emisiones de N_2O con uso de urea como fuente convencional de N, en comparación con fuentes alternativas

como residuos orgánicos, fuentes líquidas y con aditivos inhibidores enzimáticos (Halvorson y Del Grosso, 2012; Baruah y Baruah, 2015).

En cuanto al CH_4, los resultados son contradictorios sobre los efectos de las fuentes nitrogenadas en la producción y emisión de este GEI. Según los resultados de Zhou et al. (2015) en el sistema de rotación arroz-colza, y los de Oo et al. (2015) en el cultivo de arroz de riego, la aplicación de N al suelo reduce las emisiones de CH_4, debido a la competencia entre las bacterias productoras de CH_4 y las reductoras de NO_3^-. Además, los fertilizantes amoniacales estimulan a la población de bacterias que oxidan el CH_4 a CO_2, impidiendo que éste llegue a la atmósfera (Shrestha et al., 2010). Por otro lado, la aplicación de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de arroz de riego puede aumentar los flujos de CH_4 en función de la mayor producción de sustratos orgánicos y facilitar la vía de emisión a través de los aerénquimas como respuesta a la estimulación del crecimiento de las plantas (Singh et al., 1999; Schimel, 2000; Linquist et al., 2012). Sin embargo, las observaciones que existen sobre la influencia de fertilizantes nitrogenados minerales sobre las emisiones de CH_4 no son concluyentes.

Una forma de mejorar la eficiencia de utilización del N en el cultivo del arroz de riego y reducir las emisiones de GEI, está relacionada a su aplicación parcializada en los momentos de mayor necesidad por las plantas (inicio de macolla e inicio del período reproductivo), asociado también al manejo del riego, donde el inicio del riego y establecimiento definitivo de la lámina de agua ocurre inmediatamente después de la primera aplicación del N en cubierta (SOSBAI, 2018).

Otra alternativa para mejorar la eficiencia de utilización del N y reducir las emisiones de N_2O es el uso de los llamados fertilizantes nitrogenados de entrega lenta. Estos fertilizantes tienen como característica la agregación de tecnologías (inhibidores de la ureasa, inhibidores de nitrificación, recubrimiento por polímeros y otros), con el fin de mejorar la eficiencia en el uso del N por las plantas, reducir las pérdidas de N, reducir las operaciones de aplicación de fertilizante, mejorar la disponibilidad a las plantas y, consecuentemente, aumentar la productividad del cultivo. Sin embargo, los resultados obtenidos con estos productos en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero son variables y no permiten dar una recomendación generalizada.

Variedades de arroz

Es sabido que las variedades de arroz afectan la magnitud de liberación de CH_4 (Moterle, 2011; Gutiérrez et al., 2013; Su et al., 2015). Para la mayoría de las variedades, la mayor tasa de emisión de CH_4 se verifica en la fase reproductiva, más precisamente en la fase de plena floración, estando relacionada con el aumento de los compuestos orgánicos que exudan las raíces, sirviendo como sustrato para las bacterias metanogénicas, y con el pleno desarrollo de las aerénquimas y otras estructuras morfológicas que contribuyen a la difusión del CH_4 a la atmósfera (Ruschel, 1992). Butterbach-Bahl et al. (1997) encontraron diferencias en las emanaciones de CH_4 entre dos variedades de arroz, atribuidos a la anatomía del sistema de aerénquima entre las variedades, aunque no identificaron tales diferencias. Otros estudios mostraron que aspectos morfológicos como el aumento del área foliar y el número estomático y el volumen de raíces tienen una correlación positiva con las tasas de emisión de metano (Nouchi et al., 1990; Mitra et al., 1999; Gogoi et al., 2005; Das y Baruah, 2008).

Al comparar la emisión de CH_4 de diferentes variedades de arroz de riego en condiciones de escasa de vegetación, Silva et al. (2014) observaron que las menores emisiones ocurrieron en variedades de menor altura, precoces y alta productividad. Este comportamiento puede estar asociado con la menor disponibilidad de C en la floración (menor exudación radicular), menor cantidad de biomasa de la parte aérea (afecta la difusión del metano a la atmósfera) y un menor tiempo de inundación del suelo para el cultivo del arroz reduciendo el tiempo de reducción del C en el suelo). En cuanto a la productividad, es necesario siempre considerar la emisión de metano en función del potencial productivo, teniendo en cuenta que la cantidad de GEI generada debe ser relativizada por kilogramo de alimento producido.

Diversificación de cultivos

La diversificación de cultivos consiste en otra opción viable para reducir las emisiones de GEI del cultivo de arroz, promoviendo, aún más el aumento de la producción y la rentabilidad de la propiedad. Esto ocurre, básicamente, porque la inserción de cultivos de secano en rotación con el arroz de riego promueve la aireación del suelo, interfiriendo en la dinámica de C y N del suelo y, consecuentemente, en las emisiones de GEI (Weller et al., 2015). La reducción en el período de permanencia del suelo bajo condiciones anaeróbicas reduce la producción y emisión de CH_4. Sin embargo, la rotación con cultivos de secano promueve la alternancia en las condiciones oxidorreducción del suelo, favoreciendo la alternancia en los procesos de nitrificación y desnitrificación, que tienen el N_2O como producto intermedio (Liu et al., 2010), incrementando las emisiones de N_2O.

En Arkansas, U.S.A., Smartt et al. (2016) verificaron que el cultivo de arroz en rotación con soya promovió una reducción significativa en las emisiones de CH_4, en comparación con el monocultivo de arroz, siendo de 7,0 y 19,6 kg CH_4-C ha^{-1}, respectivamente. Por su parte, Yan et al. (2005) reunieron datos de emisiones de CH_4 de diversos sistemas inundados de China y propusieron una ecuación para estimar las emisiones de GEI a partir de diversos parámetros ambientales, incluyendo el manejo del agua en el período anterior al cultivo de arroz de riego. La aplicación de la ecuación indicó la posibilidad de reducción en las emisiones de CH_4 del cultivo de arroz, manteniéndose el suelo drenado por un período prolongado. Este resultado muestra que la rotación con cultivos de secano o incluso el mantenimiento previo del suelo bajo barbecho y drenado, contribuyen decisivamente a mitigar las emisiones de CH_4 del arroz de riego.

Por otro lado, estudios realizados por Nishimura et al. (2005; 2011) en Japón mostraron que la conversión de áreas con monocultivo de arroz de riego a sistemas de producción de arroz aeróbico o con la rotación de soja/trigo, proporcionó un aumento significativo en las emisiones de N_2O del suelo, aunque habían reducido las emisiones de CH_4 del arroz de riego, cuando se establece en rotación con cultivos de secano. También Yao et al. (2010) midieron los flujos de N_2O de la rotación arroz de riego/trigo, verificando reducciones en las emisiones de N_2O del suelo durante el cultivo del arroz, por la incorporación de residuos de paja de arroz compostada o paja fresca de trigo, inmediatamente antes de la inundación del suelo para el cultivo de arroz.

Consideraciones finales

El ambiente inundado presenta características y propiedades bastante distintas de aquellas observadas en condiciones no inundadas, lo que se ve reflejado en la dinámica del carbono y de varios elementos en el suelo. Los ambientes inundados, como los observados en el cultivo del arroz, causan la ausencia del oxígeno molecular en algunas partes del suelo, con el consiguiente cambio del metabolismo microbiano aeróbico hacia el anaeróbico. Así, cambia la población microbiana predominante y los productos de la descomposición influencian el stock de carbono y la calidad de la materia orgánica del suelo, la liberación de ácidos orgánicos y la emisión de GEI. El conocimiento de las alteraciones que ocurren en los ambientes inundados, asociado al entendimiento de los factores que regulan esas transformaciones, es fundamental para el adecuado manejo del suelo en esas condiciones y, por lo tanto, para la producción sustentable de arroz.

La producción sostenible de arroz es una prioridad actual de la investigación y del propio sector productivo, que experimentan el desafío de aumentar la producción de arroz para atender la creciente demanda de la población y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental de la agricultura mediante la mitigación de las emisiones de GEI.

Referencias

Ahmad, S., Li, C., Dai, G., et al. 2009. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China. Soil Till. Res. 106:54-61.

Aidar, S.T., Chaves, A.R.M., Fernandes Junior, P.I., et al. 2017. Vegetative desiccation tolerance of *Tripogon spicatus* (Poaceae) from the tropical semiarid region of northeastern Brazil. Funct. Plant Biol. 44:1124-1133.

Alves, B.J.R. 2015. Emissões de óxido nitroso de solos agrícolas e de manejo de manejo de dejetos. In Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência - Setor Agropecuária. MCTI, Brasília, DF, Brasil.

Aneja, V.P., Blunden, J., James, K., et al. 2008. Ammonia assessment from agriculture: U.S. status and needs. J. Environ. Qual. 37:515-520.

Aneja, V.P., Nelson, D., Roelle, P., et al. 2003. Agricultural ammonia emissions and ammonium concentrations associated with aerosols and precipitation in the southeast United States. J Geophys. Res. 108:1-11.

Anjos, J.T., Tedesco, M.J. 1976. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. Científica 4:49-55.

Aselmann, I., Crutzen, J. 1989. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their primary productivity, seasonality and possible methane emissions. J. Atmos. Chem. 8:307-358.

Baruah, A., Baruah, K.K. 2015. Organic manures and crop residues as fertilizer substitutes: Impact on nitrous oxide emission, plant growth and grain yield in pre-monsoon rice cropping system. J. Environ. Prot. 6:755-770.

Bayer, C., Amado, T.J.C., Tornquist, C.G., et al. 2011. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na Agricultura Conservacionista. Tópicos Ciência do Solo 7:55-118.

Bayer, C., Costa, F.S., Pedroso, G.M., et al. 2014. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flooded irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a Humid Subtropical climate. Field Crops Res. 162:60-69.

Bayer, C., Zschornack, T., Pedroso, G.M., et al. 2015. A seven-year study on the effects of fall soil tillage on yield-scaled greenhouse gas emission from flood irrigated rice in a humid subtropical climate. Soil Till. Res. 145:118-125.

Bayer, C., Zschornack, T., Sousa, R.O., et al. 2013. Strategies to mitigate methane emissions in lowland rice fields in South Brazil. Better Crops 97:27-29.

Bloom, A. 2012. Emissions from rice production. In Cutle, J.C. (ed.) Encyclopedia of earth. http://editors.eol.org/eoearth/wiki/Emissions_from_Rice_Production.

Butterbach-Bahl, K., Papen, H., Rennenberg, H. 1997. Impact of gas transport through rice cultivar on methane emission from rice paddy fields. Plant Cell Environ. 20:1175-1183.

Cai, Z., Xing, G., Yan, X., et al. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. Plant Soil 196:7-14.

Campos, M.L.A.M., Abreu, D.G., Francelin, R., et al. 2018. Efeito estufa. 2018. http://www.usp.br/qambiental/efeitoestufa.htm.

Cassman, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 96:5952-5959.

Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., et al. 2018. Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in Latin America and the Caribbean: a review on the transition from ideality to reality. Sustainability 10:671.

Conrad, R. 2002. Control of microbial methane production in wetland rice fields. Nutr. Cycling Agroecosyst. 64:59-69.

Copetti, A.C.C. 2014. Emissão de óxido nitroso e metano em um planossolo alagado em casa de vegetação. 97 p. Tesis de Doctorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

Costa, F.S. 2005. Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtrópico brasileiro. 145 p. Tesis de Doctorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

Costa, F.S., Zanatta, J.A., Bayer, C. 2008. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. p. 545-559. In Santos, G.A., Silva, L.S., Canellas, L.P., Camargo, F.A.O. (Org.) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Metrópole, Porto Alegre, Brasil.

Cuadra, S.V., Steinmetz, S., Heinemann, A.B., et al. 2015. Impacto das mudanças climáticas sobre o desenvolvimento a produtividade do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. In Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Lavras. Agrometeorologia no século 21: o desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros: Anais. UFLA, Lavras, Brasil.

Das, K., Baruah, K.K. 2008. Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant. Physiol. Plant. 134:303-312.

Denier van der Gon, H.A.C., Neue, H.U. 1995. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field. Global Biogeochem. Cycles 9:11-22.

Dubey, S.K. 2005. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: a review. Applied Ecol. Environ. Res. 3:1-27.

Epule, E.T., Peng, C., Mafany, N.M. 2011. Methane emissions from paddy rice fields: strategies towards achieving a win-win sustainability scenario between rice production and methane emission reduction. J. Sustain. Dev. 4:188-196.

Gogoi, N., Baruah, K.K., Gogoi, B. 2005. Methane emission characteristics and its relations with plant and soil parameters under irrigated rice ecosystem of northeast India. Chemosphere 59:1677-1684.

GRiSP. 2013. Rice almanac. 4ª ed. Global Rice Science Partnership (GRiSP). International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.

Gutierrez, J., Kim, S.Y., KIM, P.J. 2013. Effect of rice cultivar on CH_4 emissions and productivity in Korean paddy soil. Field Crops Res. 146:16-24.

Halvorson, A.D., Del Grosso, S.J. 2012. Nitrogen source and placement affect soil nitrous oxide emissions from irrigated corn in Colorado. Better Crops 96:7-9.

Hou, A.X., Chen, G.X., Wang, Z.P., et al. 2000. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:2180-2186.

Hussain, S., Peng, S., Fahad, S., et al. 2015. Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: a review. Environ. Sci. Pollut. Res. 22:3342-3360.

IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (NGGIP). 3 v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html.

IPCC. 2001. Climate change 2001: The scientific basis. In Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., et al. (eds.) Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

IPCC. 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. In Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., et al. (eds.) Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.

IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al. (eds.) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Final Draft Underlying Scientific Technical Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC. 2015. Climate change 2014: mitigation of climate change. v.3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Isherwood, K.F. 2000. Mineral fertilizer use and the environment. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.

Itoh, M., Sudo, S., Mori, S., et al. 2011. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. Agric. Ecosyst. Environ. 141:359-372.

Ittersum, M.K., van Vries, S., Oort, P.A., et al. 2016. Estimation of global yield gaps and implications from their analysis. Proceeding International Fertilizer Society, Colchester, UK.

Jacinthe, P.A., Lal, R. 2005. Labile carbon and methane uptake as affected by tillage intensity in a Mollisol. Soil Till. Res. 80:35-45.

Ko, J.Y., Kang, H.W. 2000. The effects of cultural practices on methane emission from rice fields. Nutr. Cycling Agroecosyst. 58:311-314.

Le Mer, J., Roger, P. 2001. Production, oxidations, emission and consumption of methane by soils: a review. Eur. J. Soil Biol. 37:25-50.

Li, C., Hang, Z., Guo, L., et al. 2013. Emissions of CH_4 and CO_2 from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods. Atm. Environ. 80:438-444.

Linquist, B.A., Adviento-Borbe, M.A., Pittelkow, C., et al. 2012. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. Field Crops Res. 135:10-21.

Liu, S., Qin, Y., Zou, J., et al. 2010. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. Sci. Total Environ. 408:906-913.

Logomarsino, A., Agnelli, A.E., Pastorell, R., et al. 2016. Past water management affected GHG production and microbial community pattern in Italian rice paddy soils. Soil Biol. Biochem. 93:17-27.

Ma, J., Ma, E., Xu, H., et al. 2009. Wheat straw management affects CH_4 and N_2O emissions from rice fields. Soil Biol. Biochem. 41:1022-1028.

Ma, B.L., Wu, T.Y., Tremblay, N., et al. 2010. On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer on ammonia volatilization. Agron. J. 102:134-144.

Magrin, G.O. Marengo, J., Boulanger, J.P., et al. 2014. Central and South America. In Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Mishra, S., Rath, A., Adhya, T., et al. 1997. Effect of continuous and alternate water regimes on methane efflux from rice under greenhouse conditions. Biol. Fert. Soils 24:399-405.

Misselbrook, T.H., Van der Weerden, T.J., Pain, B. F., et al. 2000. Ammonia emission factors for UK agriculture. Atmos. Environ. 34:871-880.

Mitra, S., Jain, M.C., Kumar, S., et al. 1999. Effect of rice cultivars on methane emission. Agric. Ecosyst. Environ.73:177-183.

MMA. 2018. Acordo de Paris. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília, Brasil. http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.

Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O. 2002. Microbiologia e bioquímica do solo. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

Moterle, D.F. 2011. Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado. 146 p. Tesis de Doctorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

MRE. 2019. Mudança do clima. Ministério das Relações Exteriores (MRE), Brasília, Brasil. http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/712

Myers, S.S., Zanobetti, A., Kloog, I., et al. 2014. Increasing CO_2 threatens human nutrition. Nature 510:139-142.

Naylor, R.L., Battisti, D.S., Vimont, D.J., et al. 2007. Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 104:7752-7757.

Neue, H.U., Wassmann, R., Lantin, R.S., et al. 1996. Factors affecting methane emissions from rice fields. Atmos. Environ. 30:17751-17754.

Nishimura, S., Akiyama, H., Sudo, S., et al. 2011. Combined emissions of CH_4 and N_2O from a paddy field was reduced by preceding upland crop cultivation. Soil Sci. Plant Nutr. 57:167-178.

Nishimura, S., Sawamoto, T., Akiyama, H., et al. 2005. Continuous, automated nitrous oxide measurements from paddy soils converted to upland crops. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1977-1986.

NOAA. 2017. Trends in atmospheric carbon dioxide. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Washington DC, USA.

Nouchi, I., Hosono, T., Aoki, K., et al. 1994. Seasonal variation in methane flux from rice paddies associated with methane concentration in soil water, rice biomass and temperature, and its modeling. Plant Soil 161:195-208.

Nouchi, I., Mariko, S., Aoki, K. 1990. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. Plant Physiol. 94:59-66.

Oo, A.Z., Win, K.T., Bellingrath-Kimura, S.D. 2015. Within field spatial variation in methane emissions from lowland rice in Myanmar. Springer Plus 4:1-11.

Pandey, D., Agrawal, M., Bohra, J.S. 2012. Greenhouse gas emissions from rice crop with different tillage permutations in rice-wheat system. Agric. Ecosyst. Environ. 159:133-144.

Portela, M.G., Leite, L.F.C. 2016. Emissões de GEE pela agricultura: o caso dos cultivos de cana-de-açúcar. Rev. Bras. Climatol. 18:377-388.

Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., et al. 2014. Food security and food production systems. p. 485-533. In Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Quadros, T. 2017. O histórico dos principais encontros e acordos climáticos mundiais. Disponible en: https://www.nexojornal.com.br/grafico/2017/11/17/O-histórico-dos-principais-encontros-e-acordos-climáticos-mundiais (Acceso en abril de 2018).

Ramirez-Villegas, J., Heinemann, A.B., Castro, A.P., et al. 2018. Breeding implications of drought stress under future climate for upland rice in Brazil. Glob. Change Biol. 24:2035-2050.

Ray, D.K., Gerber, J.S., Mac Donald, G.K., et al. 2015. Climate variation explains a third of global crop yield variability. Nat. Commun. 6:5989.

Rhode, H. 1990. A comparison of contribution of various gases to the greenhouse. Science 248:1217-1219.

Ruschel, A.P. 1992. O efeito estufa e a cultura arrozeira. Lavoura Arrozeira 45:3-4.

Santos, P.M., Pezzopane, J.R.M., Silva, F.A.M., et al. 2010. Zoneamento de riscos climáticos para o consórcio milho x capim-marandu no Estado de São Paulo: períodos favoráveis para a

implantação por município. Documentos 97. 40 p. Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, São Paulo, Brasil.

Sass, R.L., Fisher, F.M., Wang, Y.B., et al. 1992. Methane emission from rice fields: The effect of flood water management. Global Biogeochem. Cy. 6:249-262.

Schils, R.L.M., Verhagen, A., Aarts, H.F.M. et al. 2005. A farm level approach to define successful mitigation strategies for GHG emissions from ruminant livestock systems. Nutr. Cycling Agroecosyst. 71:163-175.

Schimel, J. 2000. Rice, microbes and methane. Nature 403:375-377.

Scott, C.E., Monks, S.A. Spracklen, D.V., et al. 2018. Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation. Nat. Commun. 9:1-9.

Shrestha, M., Sherestha, P.M., Frenzel, P., et al. 2010. Effect of nitrogen fertilization on methane oxidation, abundance, community structure, and gene expression of methanotrophs in the rice rhizosphere. ISME J. 4:1545-1556.

Silva, L.S., Moterle, D.F., Oliveira, J.M.S. 2014. The impact of different rice cultivars on soil methane emissions. p. 85-98. In Oelbermann, M (ed.) Sustainable agroecosystems in climate change mitigation. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Netherlands.

Silva, L.S., Sousa, R.O., Pocojeski, E. 2008. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. p. 525-543. In Santos, G.A., Silva, L.S., Canellas, L.P., et al. (eds) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2a ed. Metrópole, Porto Alegre, Brasil.

Singh, S., Singh, J.S., Kashyap, A.K. 1999. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. Soil Biol. Biochem. 31:1219-1228.

Six, J., Ogle, M.S., Breidt, F.J., et al. 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. Global Change Biol. 10:155-160.

Smartt, A.D., Brye, K.R., Rogers, C.W., et al. 2016. Previous crop and cultivar effects on methane emissions from drill-seeded, delayed-flood rice grown on a clay soil. Appl. Environ. Soil Sci. 2016:ID9542361.

SOSBAI. 2018. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. 205 p. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado (SOSBAI), Cachoeirinha, Brasil.

Sousa, R.O., Camargo, F., Vahl, L. 2012. Solos alagados (reações de redox). p. 177-197. In Fundamentos de Química do Solo. 5 ed. Evangraf, Porto Alegre, Brasil.

Steinmetz, S., Wrege, M.S., Pinheiro, M.J., et al. 2005. Impacto do aquecimento global na redução do risco de frio em arroz irrigado no Rio Grande do Sul. p. 247-250. In Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, Santa Maria. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

Stevanović, M., Popp, A., Lotze-Campen, H., et al. 2016. The impact of high-end climate change on agricultural welfare. Sci. Adv. 2(8):1-9.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., et al. 2013. IPCC 2013: Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Su, J., Hu, C., Yan, C., et al. 2015. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice. Nature 523:602-606.

Teixeira, M.A., Murray, M.L., Carvalho, M.G. 2006. Assessment of land use and land use change and forestry (LULUCF) as CDM projects in Brazil. Ecol. Econ. 60:260-270.

USEPA. 2006. Global anthropogenic non-CO_2 greenhouse gas emission: 1991-2020. United States Environmental Protection Agency (USEPA), Washington D.C., USA.

Wang, B., Neue, H.U., Samonte, H.P. 1999. Factors controlling diel patterns of methane emission via rice. Nutr. Cycling Agroecosyst. 53:229-235.

Wassmann, R., Jagadish, S.V.K., Sumfleth, K., et al. 2009. Regional vulnerability of climate change impacts on Asian rice production and scope for adaptation. Adv. Agron. 102:91-133.

Wassmann, R., Lantin, R.S., Neue H.U., et al. 2000. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. III Mitigation options and future research needs. Nutr. Cycling Agroecosyst. 58:23-36.

Wassmann, R., Papen, H., Rennenberg, H. 1993. Methane emission from rice paddies and possible mitigation strategies. Chemosphere 26:201-207.

Weller, S., Kraus, D., Ayag, K.R.P., et al. 2015. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems. Nutr. Cycling Agroecosyst. 101:37-53.

WMO. 2013. The Global Climate 2001-2010. A decade of climate extremes. n. 1103. 112 p. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Xu, J.G., Heeraman, D.A., Wang, Y. 1993. Fertilizer and temperature effects on urea hydrolysis in undisturbed soil. Biol. Fert. Soils 16:63-65.

Yan, X., Akiyama, H., Yagi, K., et al. 2002. Global estimates of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. Global Biogeochem. Cy. 23:GB2002.

Yan, X., Yagi, K., Akiyama, H., et al. 2005. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. Global Change Biol. 11:1131-1141.

Yao, H., Zhou, Z., Zheng, X., et al. 2010. Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystem in China. Plant Soil 327:315-330.

Zhao, C., Liu, B., Piao, S., et al. 2018. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 114:9326-9331.

Zhou, M., Zhu, B., Bruggemann, N., et al. 2015. Nitrous oxide and methane emissions from a subtropical rice-rapeseed rotation system in China: A 3-year field case study. Agric. Ecosyst. Environ. 212:297-309.

Zou, J., Huang, Y., Jiang, J., et al. 2005. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. Global Biogeochem. Cy. 19:GB2021.

Capítulo 25. Emisiones de gases de efecto invernadero en el cultivo del arroz en Chile

Sara Hube S., Gabriel Donoso Ñ., Marta Alfaro V., Viviana Becerra V., Mario Paredes C.

Efecto invernadero y cambio climático

La atmósfera es una delgada capa de gases que rodea la Tierra y que resulta fundamental para el desarrollo de la mayor parte de la vida en el planeta, compuesta, mayoritariamente, por nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). Sólo un 1 % de su composición corresponde a los gases que son responsables del fenómeno natural conocido como efecto invernadero, que consiste en un proceso físico donde la radiación infrarroja emitida desde la superficie terrestre, es absorbida por moléculas gaseosas, lo que hace que la luz solar sea más eficiente para calentar la atmósfera y elevar su temperatura media, otorgando condiciones favorables para el desarrollo de la vida. Los gases más importantes en este proceso son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) y se conocen como Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Caballero et al., 2007).

Las actividades antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo, la deforestación y las actividades agropecuarias, entre otras, han generado un aumento significativo de los GEI en la atmósfera que contribuyen a un rápido incremento de la temperatura media de la Tierra. Este fenómeno es conocido como calentamiento global y se estima que, a la fecha, corresponde a 1 °C con respecto a los niveles preindustriales, siendo probable que llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2050 si continúa aumentando al ritmo actual. Este incremento de la temperatura ha dado lugar a profundas alteraciones en los sistemas humanos y naturales, incluidos aumentos en las sequías; inundaciones y algunos otros tipos de clima extremo; aumento del nivel del mar; y pérdida de biodiversidad (IPCC, 2014). Las personas más afectadas viven en países de ingresos bajos y medios, algunos de los cuales han experimentado una disminución en la seguridad alimentaria (IPCC, 2012).

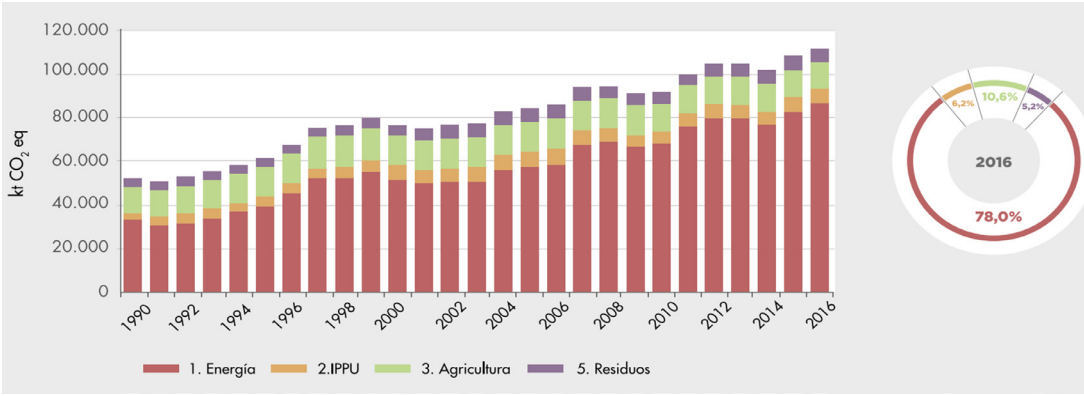
A nivel mundial se han considerado cinco sectores como los principales emisores de GEI, entre éstos el sector AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use o Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) es responsable del 24 % de las emisiones globales (Tubiello et al., 2014), siendo el segundo sector más importante en sus contribuciones, detrás del sector energía y uso de combustibles fósiles.

El promedio mundial de emisiones de CO_2 por persona es de 4,4 t CO_2. Chile, aunque sólo contribuye con aproximadamente 0,25 % al total mundial de las emisiones de GEI, sobrepasa por muy poco el promedio mundial, al registrar 4,7 t CO_2 por persona, cifra que se encuentra por debajo del promedio de los países de la OCDE que alcanzan 9,2 t CO_2 por persona (MMA, 2018). Sin embargo, es importante notar que las emisiones del país se han incrementado en un 114,7 % desde 1990 y en 20 % desde 2007. El principal GEI emitido en 2016 fue el CO_2 (78,7 %), seguido del CH_4 (12,5 %), N_2O (6 %) y los gases fluorados (2,8 %) (MMA, 2018).

En la agricultura, el arroz es el cereal que más contribuye en la emisión de GEI, representando un 10 % de las emisiones del sector AFOLU. Los principales gases emitidos por este sector son el CH_4 y N_2O, cuyos potenciales de calentamiento global (PCG) son 28 y 265 veces superiores al de 1 molécula de CO_2.

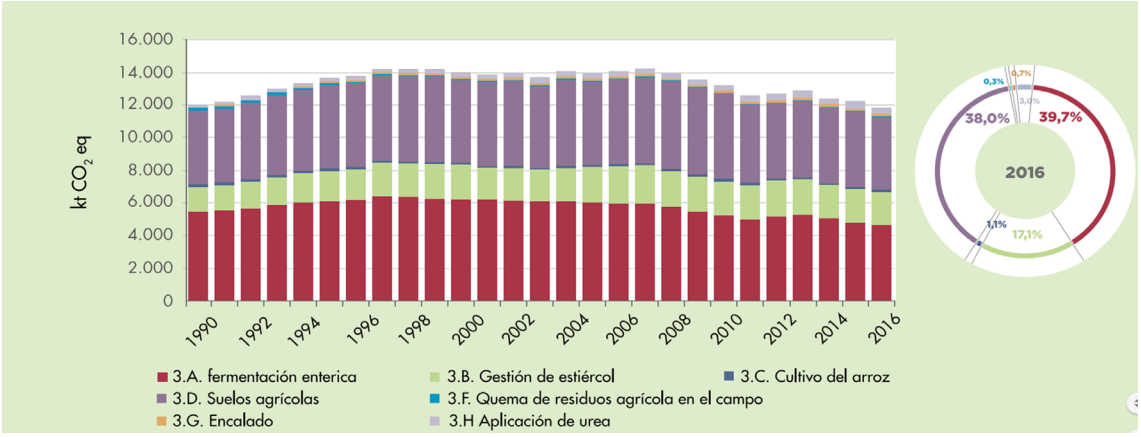
En Chile, el sector Energía es el principal contribuyente a las emisiones con un 78 % del total nacional, seguido por Agricultura con un 10,6 % (Figura 1). Dentro del sector agricultura el cultivo de arroz es la quinta categoría emisora de GEI, representando el 1,1 % (Figura 2). En 2016, sus emisiones totalizaron 133,7 kilotoneladas de equivalente de CO_2 (kt CO_2 eq), las que presentaban una disminución en un 18,6 % desde 1990, pero con un nuevo incremento de 26,4 %, desde 2013. El

principal causante de la tendencia y las variaciones interanuales es la variabilidad de la superficie plantada, la que depende fuertemente del precio internacional y de las importaciones de arroz (MMA, 2019).



Fuente: MMA, 2019

Figura 1. Emisión de GEI en los cinco principales sectores emisores. (IPPU: Industrial Processes and Product Use).

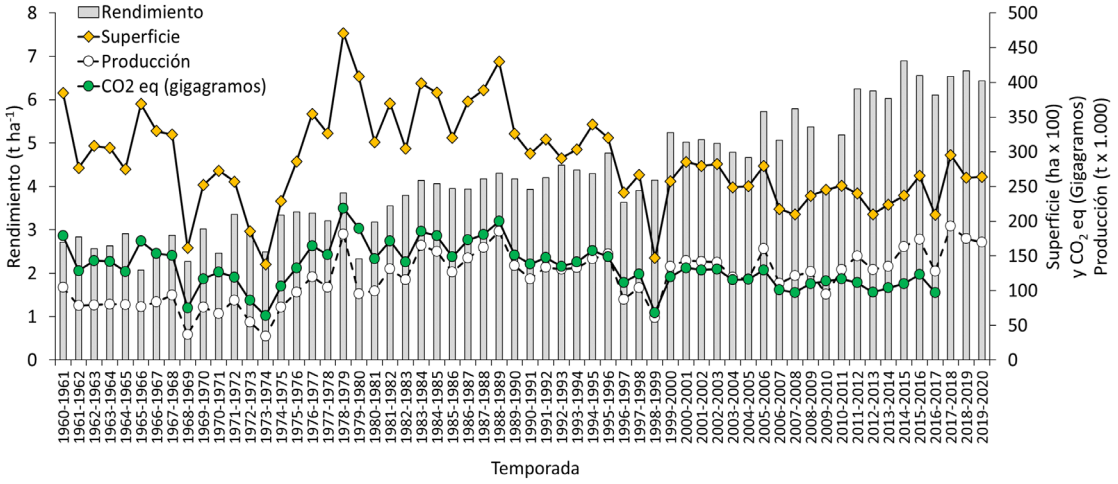


Fuente: MMA, 2019

Figura 2. Distribución de las emisiones de GEI en los distintos sectores y distribución de las emisiones globales en el sector AFOLU.

En Chile, la superficie dedicada al cultivo de arroz es cercana a 26 mil hectáreas (Figura 3). El arroz se cultiva en la Región del Maule en las comunas de Linares, Longaví, Retiro, Parral (Carbonell, 2017) y la recientemente creada Región de Ñuble en las comunas de Ñiquén, San Carlos y San Nicolás. El típico suelo arrocero en Chile presenta baja infiltración y una capa de tosca impermeable a baja profundidad (Paredes et al., 2013).

Considerando la información de rendimientos, producción y superficie desde 1960, se observa una constante disminución en la superficie sembrada con arroz desde 1978 (FAO, 2020a). A pesar de ello, el incremento del rendimiento en grano ha aumentado, con una menor superficie de siembra. Adicionalmente, a pesar del incremento de la producción y los rendimientos, la emisión de GEI, calculada como CO_2 equivalente, ha mostrado una disminución (FAO, 2020b) (Figura 3).



Fuente: FAO, 2020a y 2020b

Figura 3. Producción de arroz y cálculo de emisión de GEI en Chile (1960-2017).

Compromisos de Chile en acuerdos Internacionales

En 1988 se creó el IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático), por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Este panel fue responsable de la preparación de un primer informe que reunió los estudios de investigación de 400 científicos, con la evidencia de que el calentamiento atmosférico de la Tierra era real y pedía a la comunidad internacional que tomara las medidas necesarias para limitar el efecto de este fenómeno.

En marzo de 1994, los gobiernos aprobaron la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ratificada por Chile el mismo año, con el objetivo de apoyar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático.

Posterior a esta situación, los países han firmado una serie de acuerdos y compromisos para estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que permita que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático y, de esta forma, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir un desarrollo económico sostenible.

Chile, al igual que todas las partes que han suscrito el Acuerdo de París, elabora, actualiza periódicamente y da a conocer el inventario nacional de sus GEI (INGEI) a la comunidad nacional e internacional (CMNUCC). Además, debe elaborar e implementar estrategias y políticas de reducción de emisiones necesarias para cumplir con los compromisos adquiridos en su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés).

Desde el 2015, año en que se presentó la primera NDC de Chile, se ha avanzado de manera sustantiva en el desarrollo de la institucionalidad, de políticas y de capacidades en materia de cambio climático. El liderazgo y organización de Chile en la Conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático del año 2019 (COP25), representó un fuerte impulso en la sensibilización y conocimiento de la problemática de cambio climático en todos los niveles de nuestra sociedad, llevando a Chile a establecer metas más ambiciosas y a dar urgencia a la acción climática (NDC, 2020).

El 9 de abril de 2020, Chile hizo entrega de la actualización de su NDC a la CMNUCC, con metas a mediano y largo plazo, con el objetivo claro de alcanzar carbono neutralidad al año 2050, tal como se ha establecido en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático que actualmente se encuentra en discusión en el Congreso Nacional. La reducción de las emisiones se cumplirá con la aplicación de políticas y medidas en todos los sectores, buscando que ésta sea efectiva y per-

manente en el tiempo, y con el logro de metas específicas del sector agrícola, como el cambio del uso del suelo y la reforestación (UTCUTS). La completa ejecución de las acciones analizadas para todos los sectores, debiera permitir alcanzar, a lo menos, un 30 % de reducción del balance de GEI en 2030, en relación a 2016 (NDC, 2020).

Emisiones de GEI en cultivo de arroz y opciones de mitigación

El cultivo de arroz de riego constituye una importante fuente de emisión de CH_4 atmosférico y, por lo tanto, tiene un impacto significativo en el clima y en la fotoquímica atmosférica. Este cultivo está fisiológicamente adaptado para crecer bajo una lámina de agua, la cual proporciona condiciones ideales para las emisiones de metano. Las tasas de emisión varían con las características del suelo, el manejo agronómico del cultivo, la temperatura y el estado vegetativo de la planta. La emisión de CH_4 desde los suelos arroceros a la atmósfera depende de los distintos mecanismos que la controlan (Conrad, 1993; Yagi et al., 1997; Le Mer y Roger, 2001).

La producción de CH_4 involucra una comunidad microbiana metanogénica que puede metabolizar en ausencia de oxígeno y con potenciales redox de menos de -150 mV, degradando la materia orgánica, a través de varios productos intermedios, a CO_2 y CH_4. Los organismos metanogénicos más importantes en suelos arroceros suelen ser los *Methanobacterium* y *Methanosarcina* (Conrad, 1993; Neue, 1993). Estos metanógenos dependen de una gran cantidad de otros microorganismos, para proporcionarles los pocos sustratos que pueden catabolizar. Entre éstos está el hidrógeno, que se incrementa rápidamente posterior a la desaparición del oxígeno, aumentando el CO_2, que a su vez es utilizado para la formación de CH_4. Una parte importante del CH_4 producido proviene de transmetilación de los ácidos volátiles, ya que el aerénquima del arroz permite la difusión del O_2 a la rizósfera y, por lo tanto, proporciona micrositios óxicos dentro del suelo saturado, anóxico. Esta situación permite la oxidación de CH_4 y hace posible la participación de otras bacterias aeróbicas en el recambio de CH_4. El aerénquima del arroz también proporciona la ruta predominante para el escape de CH_4 del suelo a la atmósfera y puede golpear burbujas que constituyen depósitos de CH_4 en el suelo sumergido (Conrad, 1993; Figura 4).

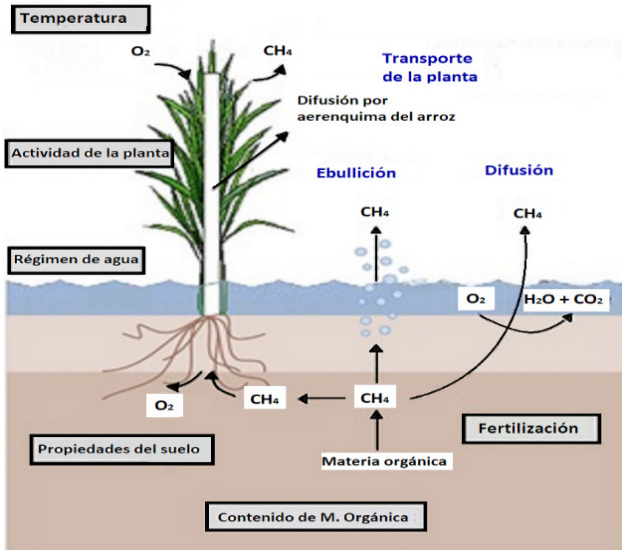


Figura 4. Mecanismos que controlan la emisión de metano en el cultivo de arroz inundado (Adaptado: Yagi et al., 1997; Sanchis et al., 2012).

La materia orgánica del suelo y de las enmiendas orgánicas aplicadas al cultivo son las principales fuentes de CH_4 en los suelos arroceros (Yagi y Minami, 1990; Kimura et al., 1992; Sanchis et al.,

2012). Sin embargo, la producción de CH_4 puede estar limitada por el pH, textura (arenosa o limosa o un alto contenido de arcilla caolinítica) que puede reducir la saturación del suelo (Neue et al., 1990; Bachelet y Neue, 1993), la capacidad de intercambio catiónico baja (suelos férricos y fírricos), la salinidad (suelos tiónicos y solonchaks), y por un alto potencial redox (Conrad, 1993; Neue, 1993; Cai et al., 2000) que permite inhibir las bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias (suelos crómicos y plínticos).

Además de los factores mencionados, existen otros factores que pueden influir en la capacidad de las bacterias CH_4-oxidantes en las emisiones de CH_4; entre ellos la variedad de arroz, la incorporación de rastrojo, manejo del agua (inundado permanente *vs.* no inundado permanente), y fertilización nitrogenada. Por lo anterior, es importante mejorar la disponibilidad de O_2 y otras prácticas de manejo agronómico que permitan reducir las emisiones de GEI. El aumento de los niveles de oxígeno en el suelo permitirá aumentar la oxidación de CH_4 rizosférica y, al mismo tiempo, disponer o proveer de sustratos para las bacterias metanogénicas en el metabolismo aeróbico o a las vías anaerobias en competencia (Gilbert y Frenzel, 1995; Yagi et al., 1997; Chirinda et al., 2018).

Avances de investigación en Chile en Gases de Efecto Invernadero en arroz

Chile como país miembro de la Alianza Global de Investigación en Gases de Efecto Invernadero en Agricultura (GRA, por sus sigla en inglés), y desde la primera reunión oficial de la Alianza en el año 2010, ha participado de las reuniones de los distintos grupos de investigación, con el objetivo de cooperar, formar capacidades técnicas, tener acceso a las metodologías de medición de GEI en agricultura, y generar información local que permita cuantificar el problema y diseñar políticas de adaptación y mitigación para la agricultura nacional.

En el año 2013 se organizó la primera reunión en Latinoamérica del grupo de investigación en arroz de la GRA. En esta reunión se estableció la necesidad de establecer un subgrupo de investigación en Latinoamérica que permitiera una mayor participación y cooperación de los países miembros, e implementar metodologías uniformes en medición de GEI para conocer los aportes reales de estos gases en los inventarios nacionales de GEI.

Tomando en cuenta estos lineamientos, el mismo año (2013) se estableció un grupo de trabajo en INIA, tendiente a adaptar e implementar la metodología y protocolos para la medición de GEI en cultivo de arroz en el país y establecer el primer experimento en este ámbito. El objetivo general de este experimento fue evaluar el efecto del nitrógeno en la emisión de GEI, para lo cual se comparó la aplicación de dos dosis de nitrógeno, aplicado en tres parcialidades: siembra, macolla e inicio de panícula. Este ensayo experimental se estableció en la Estación Experimental Francisco Jiménez del INIA, ubicado en la localidad de Parral.

Los resultados no presentaron diferencias significativas de las dos dosis de nitrógeno utilizadas sobre el rendimiento en arroz paddy (Figura 5).

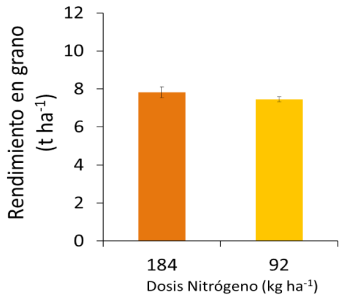


Figura 5. Efecto de la dosis de nitrógeno en el rendimiento en grano de arroz en la temporada 2013-2014, en la localidad de Parral.

Los resultados de las mediciones de GEI realizadas periódicamente durante el ciclo de desarrollo del cultivo del arroz, permitieron observar un aumento del metano, hasta la etapa de floración de la planta, donde alcanza el máximo, con una posterior disminución de las emisiones hasta el período de madurez (Figura 6).

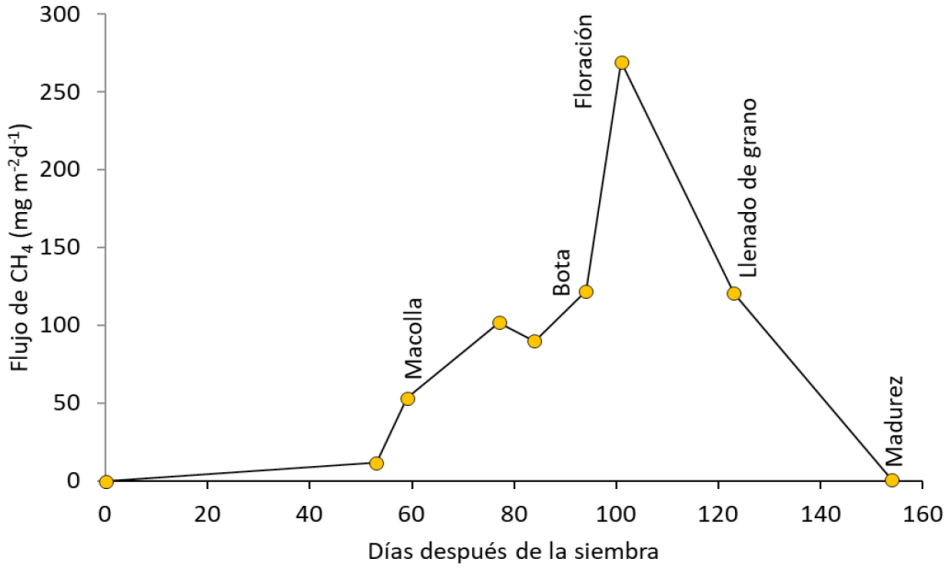


Figura 6. Emisión diaria de metano por etapa fenológica del cultivo del arroz en la temporada 2013-2014, en Parral.

Posteriormente, otros estudios experimentales tuvieron como objetivo general determinar el efecto de la incorporación del rastrojo y la aplicación de nitrógeno (92 kg N ha^{-1}) sobre las emisiones de metano en el cultivo de arroz. Estos ensayos se realizaron durante las temporadas 2014-2015 y 2015-2016, en la misma localidad de Parral. Los resultados de estos ensayos indicaron un efecto positivo del nitrógeno y de la incorporación de rastrojo sobre el rendimiento de grano del arroz, es decir, un rendimiento de 6 t ha^{-1} en ausencia de N y sin rastrojo y un promedio de 9 t ha^{-1} con incorporación de rastrojo y N al suelo, parcializado a la siembra, macolla e inicio de panícula (Figura 7).

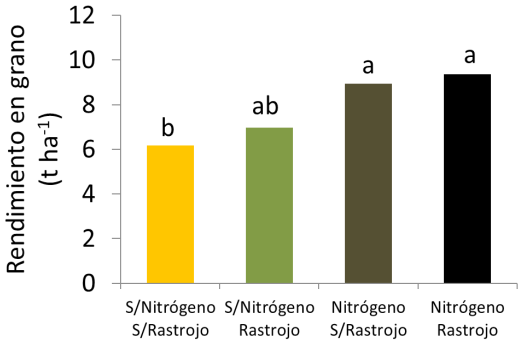


Figura 7. Rendimiento en grano de arroz en diferentes condiciones, uso de nitrógeno y presencia de rastrojo, en las temporadas 2014-2015 y 2015-2016, en Parral. Letras diferentes corresponden a diferencias entre las medias (LSD Fisher; $p<0,05$).

Los resultados obtenidos de las evaluaciones realizadas entre los años 2013-2016, proporcionaron la primera información empírica sobre las emisiones de GEI en arroz de Chile (Figura 8). En la temporada 2013-2014 se observaron valores de emisión de metano entre 105 y 130 kg CH_4 ha^{-1}, sin diferencia entre los tratamientos con diferentes dosis de nitrógeno. Sin embargo, los valores más altos se obtuvieron en la temporada 2014-2015 (245-315 kg CH_4 ha^{-1}) donde no se observó diferencia entre los tratamientos. Por otro lado, los valores más bajos se observaron en la temporada 2014-2015 (58-105 kg CH_4 ha^{-1}) en los tratamientos sin incorporación de rastrojo.

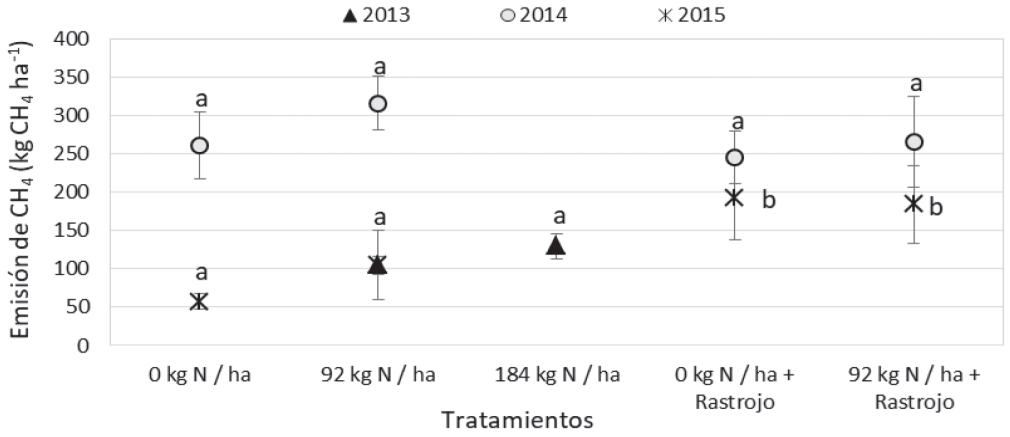


Figura 8. Emisión acumulada de CH_4 (kg de CH_4 ha^{-1}) por tratamiento y temporada de cultivo evaluada. Barras de error corresponde al error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento por año evaluado ($p<0,05$).

Finalmente, al analizar la correlación que existe entre el rendimiento y la emisión de GEI, se observó una correlación positiva, significativa (R^2=0,8; $p<0,05$) (Figura 9). Con ello se puede inferir que el incremento de los rendimientos en grano podría estar asociado a un incremento en la emisión de GEI en nuestro país.

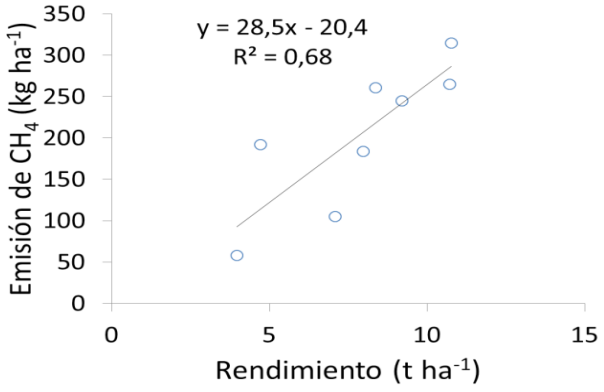


Figura 9. Correlación entre el rendimiento en grano y la emisión de metano. La línea continua corresponde a línea de tendencia de una regresión lineal. La línea corresponde a la ecuación que explica la variación observada en los datos, y que está expresada en el coeficiente de determinación R^2.

Esta investigación preliminar permitió a INIA continuar participando en foros y proyectos internacionales como el proyecto ´Formación de capacidades en tecnologías de gestión para el cultivo

de arroz climáticamente inteligente, en el sector arrocero del Sudeste de Asia y América Latina`, financiado por el Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) en el año 2018. El objetivo del proyecto fue, por un lado, compartir resultados de investigación e intercambiar información sobre tecnologías de gestión para la adaptación y mitigación del cambio climático en el sector del arroz con los países miembros de la APEC y, por otro lado, difundir a nivel local la información disponible a los actores de la cadena arrocera nacional. Esta actividad fue realizada en la ciudad de Parral (Foto 1).

Foto 1. Participantes de Seminario de Capacitación Internacional y Día de Campo en la Estación Experimental Francisco Jiménez, en Parral, Chile.

Más arroz con menos emisiones y menor consumo de agua

El sector agrícola enfrenta el doble desafío de aumentar la producción de alimentos para satisfacer las crecientes demandas, mientras intenta adaptarse al clima cambiante. Dos aspectos son prioritarios en el cultivo del arroz. El primero es la urgente necesidad de hacer un mejor uso del agua, sobre todo en el período actual de sequía que está afectando la región. Segundo, es la necesidad de evaluar como país, los niveles de emisión de GEI que el cultivo del arroz genera, debido a que éste es una de las especies que más contamina el ambiente con CH_4.

El proyecto FONTAGRO se focaliza en ambos problemas: disminuir el uso de agua, para disminuir las emisiones de GEI, sin afectar los rendimientos, como una forma de tener un arroz más sustentable. Los tres países participantes del proyecto (Colombia (Líder), Chile y Perú) tienen como objetivo general evaluar la técnica del riego intermitente (AWD, Alternate Wetting and Drying) como alternativa de mitigación sobre las emisiones de GEI, manteniendo los niveles productivos del arroz. La técnica de riego intermitente (AWD) aumenta la disponibilidad de O_2 durante el drenado del agua del suelo, otorgando condiciones y sustratos para bacterias metanogénicas en el metabolismo aeróbico o en vías anaerobias en competencia, lo que permite reducir las emisiones de CH_4 (Yagi et al., 1997; Hou et al., 2000). Las evaluaciones realizadas incluyen el rendimiento y calidad del arroz producido, las emisiones de gases, consumo de agua, y los costos asociados al uso de estas tecnologías.

El AWD es una tecnología que ha sido ampliamente probada y promovida en varios países de Asia, especialmente en Filipinas, China, Vietnam y Bangladesh. En Filipinas, la tecnología ha sido probada y promovida desde 2001 (Lampayan et al., 2003). La práctica de manejo del riego incluye períodos alternados de inundación y secado (AWD), durante las fases de crecimiento no crítico del cultivo, aumentado la eficiencia en el uso del agua en un 23 %, sin afectar el rendimiento en

grano (Bouman y Tuong, 2001; Carrijo et al., 2017). El AWD consiste en que el suelo se seca periódicamente, entre el estado de 3-5 hojas hasta el inicio de la panícula, y cuando se agota el agua disponible del suelo en un 50 %, se riega dejando una lámina de agua de 5 cm y así sucesivamente. De esta manera, este sistema genera un ahorro de agua de riego de un 29 % (equivalente a 2.067 m^3 ha^{-1}). Si bien en algunos casos se han reportado pérdidas de rendimiento de 1,3 t ha^{-1} de arroz (Carracelas et al., 2019), otras experiencias muestran ahorros de entre 43 y 54 %, en comparación al control, sin pérdidas de rendimiento en grano (7 a 8 t ha^{-1}) y con una mayor productividad de agua (Lampayan et al., 2015).

Otros estudios han informado una reducción en el aporte de agua en un 15 % a 30 %, sin que ello tenga un impacto significativo en el rendimiento. Al parecer, un régimen moderado de intermitencia de humedad y secado del suelo puede mejorar el crecimiento de las raíces, lo que beneficia a otros procesos fisiológicos, y da como resultado un mayor rendimiento de grano (Zhang et al., 2009). Por lo tanto, el sistema AWD es un sistema de riego adecuado para reducir el costo de riego, aumentar las ganancias, mantener un riego adecuado y asegurar el potencial de rendimiento de los cultivos (Carracelas et al., 2019). Por otro lado, el sistema tradicional de inundación continua del arroz ha presentado, como consecuencia una tendencia a una mayor acumulación de arsénico en el grano de arroz, junto a mayores emisiones de GEI (Seyfferth et al., 2018).

Durante la temporada 2018-2019 se estableció el primer ensayo en la Estación Experimental Francisco Jiménez del INIA, ubicado en la localidad de Parral. Para este ensayo se evaluó la variedad ´Zafiro-INIA`, bajo el sistema AWD con una profundidad de riego de 5 cm (AWD1) y 10 cm (AWD2), usando como testigo la inundación permanente. Además, se evaluaron dos sistemas de siembra (pregerminada y siembra directa). Los tratamientos de riego se realizaron entre etapa de plántula e inicio de etapa reproductiva. La fertilización se realizó basada en el análisis de suelo (120 kg de Superfosfato Triple ha^{-1}; 160 kg de muriato de potasio ha^{-1} y 340 kg de urea ha^{-1}). Tanto para la siembra directa y la siembra de pre germinado, se realizó un control químico de malezas convencional del cultivo de arroz, mediante herbicidas de post-emergencia. Para la medición y monitoreo de altura de agua de riego, se utilizaron piezómetros en cada parcela y la cuantificación del agua utilizada se realizó mediante caudalímetros (3/4") (Figura 10).

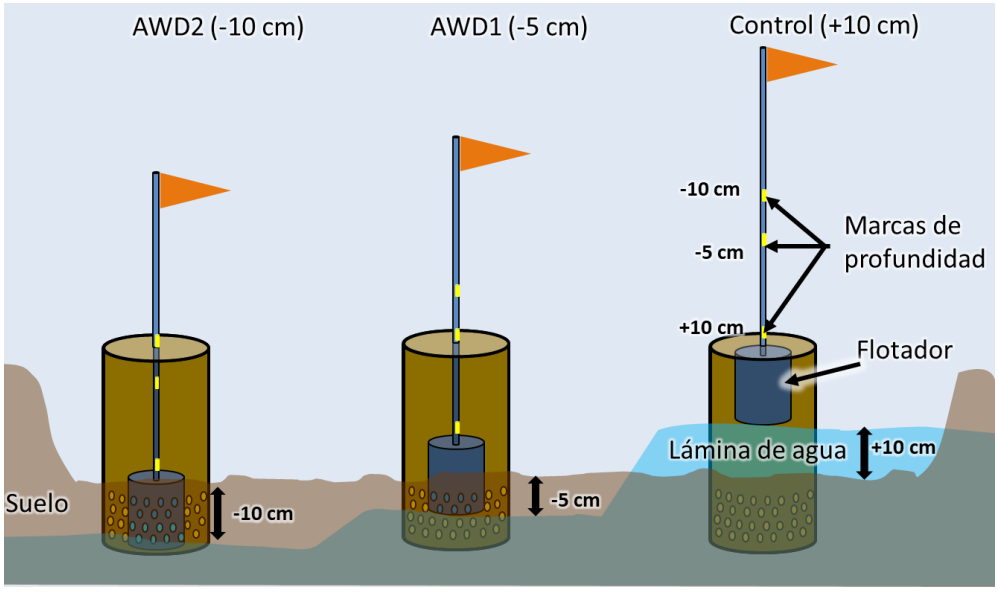


Figura 10. Modelo de piezómetros utilizados para monitoreo del nivel de agua en los tratamientos. Control (lámina de agua sobre 10 cm de la superficie del suelo (+10 cm); AWD1 (lámina de agua bajo 5 cm de la superficie del suelo (-5 cm).; y AWD2 (lámina de agua bajo 10 cm de la superficie del suelo (-10 cm).

Los GEI se midieron en tres tiempos de muestreo y 36 veces entre octubre y abril, y con una mayor frecuencia de medición después de cada práctica agronómica realizada sobre las parcelas (siembra, riego, control de malezas y aplicación de fertilizante). Se usaron cámaras estáticas (Foto 2), con altura variable dependiendo del tamaño del arroz. El diseño fue de bloques al azar, con cuatro repeticiones por tratamiento. Los GEI fueron analizados por cromatografía de gases, Perkin Elmer Modelo Clarus 600, y los resultados fueron analizados por ANOVA.

Foto 2. A: Cámara inicial; B: Cámaras para estado más avanzado de crecimiento.

Efecto del AWD sobre el rendimiento en arroz

En siembra directa, el rendimiento en grano paddy del tratamiento de control (9,6 t ha^{-1}) fue similar a los tratamientos de AWD1 y 2 (11,3 y 7,6 t ha^{-1}, respectivamente) (Figura 11 A). Solamente se destaca que el tratamiento de AWD2 presentó rendimientos un 37 % inferiores al tratamiento AWD1. Esto indica que la disminución del agua de hasta 10 cm bajo el nivel del suelo, afectó el desarrollo de la planta y su rendimiento en grano (Gutiérrez, 2019).

Por otro lado, en la siembra de arroz pregerminado (B), el tratamiento de control (inundación permanente) y los tratamientos AWD1 y AWD2 obtuvieron rendimientos de 9,6, 9,9 y 8,8 t ha^{-1}, respectivamente. En este sistema de siembra no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos AWD (Figura 11 B).

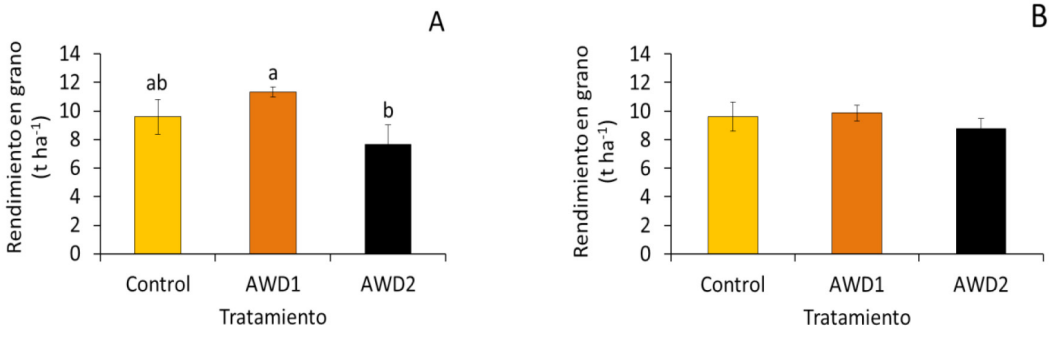
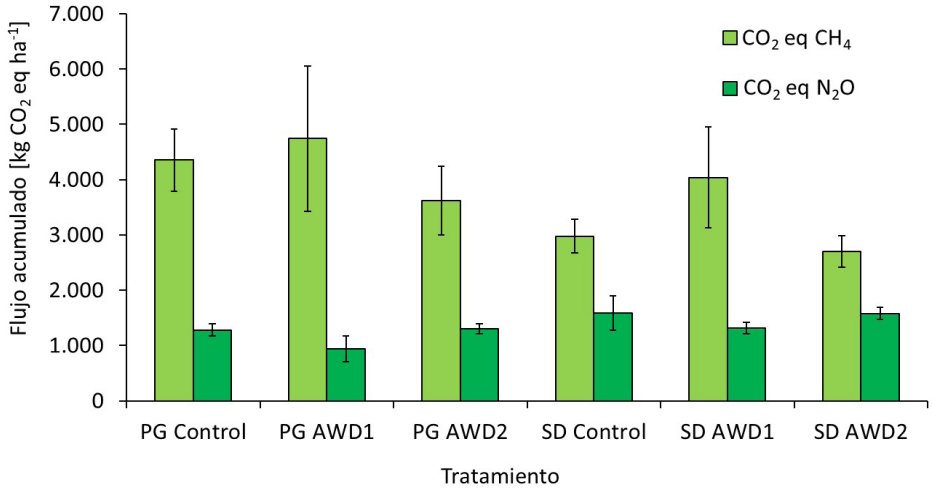


Figura 11. Rendimiento en grano en siembra directa (A) y siembra pregerminada (B), con distintos tratamientos de riego. Control= inundado permanente; AWD1=5 cm; AWD2=10 cm. Temporada 2018-2019, Parral. Letras minúsculas corresponden a diferencias entre las medias de los tratamientos (P>0,05, LSD Fisher).

Efecto del AWD sobre los niveles de GEI en arroz

El análisis de la emisión de gases de efecto invernadero mostró un importante aumento en la emisión de metano en el ensayo siembra pregerminado, en comparación con la siembra directa (Figura 12). Por otro lado, la emisión de óxido nitroso fue levemente superior en el sistema de siembra directa en comparación al sistema inundado. Los valores más bajos de emisión de metano se observaron en los tratamientos con menos uso de agua (AWD2), siendo más notoria esa diferencia en el ensayo de siembra de arroz pregerminado (Figura 12).



Fuente: Proyecto Fontagro 2021

Figura 12. Flujo acumulado durante 162 días (kg CO_2 eq ha^{-1}) de metano y oxido nitroso en diferentes tratamientos de riego y metodología de siembra. PG (siembra pregerminado) y SD (siembra directa). Control (inundación permanente), AWD1 (inundación intermitente hasta cuando el nivel de agua baja a -5 cm de la superficie del suelo) y AWD2 (inundación intermitente hasta cuando el nivel de agua baja a -10 cm de la superficie del suelo).

Consideraciones finales

Hasta ahora, los resultados muestran que es posible usar menos agua para producir rendimientos sustentables, con una tendencia a disminuir la emisión de metano cuando se utiliza menos agua, y un incremento en el óxido nitroso. Con los resultados de dos temporadas, se generará una propuesta tecnológica, que deberá ser validada en campos de productores, y además se aportarán factores de emisión país específico para la construcción de los inventarios nacionales de GEI.

Referencias

Bachelet, D., Neue, H. 1993. Methane emissions from wetland rice areas of Asia. Chemosphere 26(1-4):219-237.

Bouman, B., Tuong, T. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. Agric. Water Manage. 49(1):11-30.

Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Rev. Digital Univ. 8(10):1-11.

Cai, Z., Tsuruta, H., Minami, K. 2000. Methane emission from rice fields in China: measurements and influencing factors. J. Geophys. Res. Atmos. 105(D13):17231-17242.

Carbonell, C. 2017. Estudio de estándar de sustentabilidad para el sector arrocero. Odepa, Santiago, Chile.

Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., et al. 2019. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. Agric. Water Manage. 222:161-172.

Carrijo, D., Lundy, M., Linquist, B. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. Field Crops Res. 203:173-180.

Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., et al. 2018. Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in Latin America and the Caribbean: A review on the transition from ideality to reality. Sustainability 10:671.

Conrad, R. 1993. Mechanisms controlling methane emission from wetland rice fields p. 317-335. In Oremland, R. (ed.) Biogeochemistry of Global Change. Springer, Boston, Massachusetts, USA.

FAO. 2020a. FAOSTAT-base de datos producción. FAO, Roma, Italia. faostat.fao.org/site/630/default.aspx.

FAO. 2020b. FAOSTAT-base de datos indicadores agroambientales. FAO, Roma, Italia. faostat.fao.org/site/630/default.aspx.

Gilbert, B., Frenzel, P. 1995. Methanotrophic bacteria in the rhizosphere of rice microcosms and their effect on porewater methane concentration and methane emission. Biol. Fert. Soils 20(2):93-100.

Gutiérrez, J. 2019. Efecto del riego intermitente sobre el cultivo del arroz. Tesis de pregrado. Universidad Adventista de Chile, Escuela de Agronomía, Chillán, Chile.

Hou, A., Chen, G., Wang, Z., et al. 2000. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. Soil Sci. Soc. Am. J. 64(6):2180-2186.

IPCC. 2012. Summary for policymakers. p. 3-21. In Field, C.B., Barros, V.R., Stocker, T.F., et al. (eds.) Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Pachauri, R.K., and Meyer, L.A. (eds.) IPCC, Geneva, Switzerland.

Kimura, M., Miura, Y., Watanabe, A., et al. 1992. Methane production and its fate in paddy fields: I. Effects of rice straw application and percolation rate on the leaching of methane and other soil components into the subsoil. Soil Sci. Plant Nutr. 38(4):665-672.

Lampayan, R.M., Bouman, B.A., de Dios, J.L., et al. 2003. Adoption of water saving technologies in rice production in the Philippines. Extension Bulletin 548. Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan.

Lampayan, R., Samoy-Pascual, K., Sibayan, E., et al. 2015. Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines. Paddy Water Environ. 13:215-227.

Le Mer, J., Roger, P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. Eur. J. Soil Biol. 37(1):25-50.

MMA. 2018. Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf.

MMA. 2019. Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile serie 1990-2016. Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Santiago, Chile.

NDC. 2020. Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile. (Disponible en: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf).

Neue, H.U. 1993. Methane emission from rice fields. Bioscience 43(7):466-474.

Neue, H., Becker-Heidmann, P., Scharpenseel, H. 1990. Organic matter dynamics, soil properties, and cultural practices in rice lands and their relationship to methane production. p. 457-466. In Bouwman, A.F. (ed.) Soils and the greenhouse effect. Wiley, Chichester, UK.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2013. Programa de arroz: Aporte a la producción Nacional. Edición Especial Programa de Arroz INIA: Transfiriendo Ciencia y Tecnología para fortalecer la competitividad del sector. Tierra Adentro 104:35-42.

Sanchis, E., Ferrer, M., Torres, A., et al. 2012. Effect of water and straw management practices on methane emissions from rice fields: a review through a meta-analysis. Environ. Eng. Sci. 29(12):1053-1062.

Seyfferth, A., Limmer, M., Dykes, G. 2018. Chapter two - On the use of silicon as an agronomic mitigation strategy to decrease arsenic uptake by Rice. Adv. Agron. 149:49-91.

Tubiello, F., Salvatore, M., Cóndor-Golec, R., et al. 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. FAO Statistics Division Working. Paper Series ESS/14-02.

Yagi, K., Minami, K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. Soil Sci. Plant Nutr. 36(4):599-610.

Yagi, K., Tsuruta, H., Minami, K. 1997. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation. Nutr. Cycling Agroecosyst. 49(1-3):213-220.

Zhang, H., Xue, Y., Wang, Z., et al. 2009. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice. Crop Sci. 49(6):2246-2260.

Capítulo 26. Metales pesados en arroz

Eimmy Ramírez M., Jorge Yáñez S., Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V.

La alimentación puede constituir una importante fuente de exposición a metales y metaloides para la población, en comparación con otras formas como la inhalación y el contacto dérmico (Jarup, 2003; Zhuang et al., 2009; Orisakwe et al., 2012). Considerando que el arroz es un alimento básico de consumo masivo para más de la mitad de la población mundial, su inocuidad es relevante (Gross y Zhao, 2014). Además, el arroz es la principal fuente de carbohidratos usada en la elaboración de alimentos para niños (infant foods) y celiacos (Guillod-Magnin et al., 2018; Jung, 2018). Varios estudios recientes han informado sobre la presencia de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg) en el arroz (Farías et al., 2015; Fu et al., 2015; Jallad, 2015; Keshavarzi et al., 2015; Liu et al., 2016; Segura et al., 2016; Nunes y Otero, 2017; Al-Saleh y Abduljabbar, 2017; Suriyagoda et al., 2018; Chen et al., 2018). Por ejemplo, en Argentina los niveles promedio de As en arroz alcanzan 380 µg kg^{-1}, en Ecuador 60 µg kg^{-1}, en Brasil 138 µg kg^{-1}, China 140 µg kg^{-1}, Bangladesh 130 µg kg^{-1}, U.S.A. 250 µg kg^{-1}, España 200 µg kg^{-1}, e Italia 150 µg kg^{-1}, entre otros países (Cuadro 1).

Cuadro 1. Concentración promedio de metales pesados en muestras de arroz.

Tipo	País de origen	As (µg kg^{-1})	Cd (µg kg^{-1})	Pb (µg kg^{-1})	Hg (µg kg^{-1})
Grano largo blanco	Australia	160	5	7	8
Orgánico negro	China	320	15	6	5
Blanco	Egipto	69	5	8	8
Blanco	Egipto	130	5	6	8
Grano largo blanco	Francia	183	12	6	4
Mezcla arroz orgánico	Alemania	380	5	11	5
Grano largo integral	India	160	5	8	6
Grano largo blanco	India	74	22	7	5
Grano largo integral	India	160	16	6	6
Grano largo blanco	Italia	350	28	6	4
Grano largo blanco	Pakistán	100	39	7	5
Samba	Sri Lanka	53	5	6	7
Rojo crudo	Sri Lanka	56	170	5	8
Grano largo blanco	Tailandia	200	5	5	6
Glutinoso	Tailandia	150	15	7	5
Grano largo blanco	U.S.A.	210	15	5	7
Medio blanco	U.S.A.	140	5	8	14
Grano largo integral	U.S.A.	370	22	6	4

Fuente: Jallad, 2015.

La exposición crónica, incluso a bajos niveles de As y metales, puede dañar múltiples órganos y está relacionada con distintas enfermedades (Tchounwou et al., 2012). Particularmente el As se asocia con mayores tasas de cáncer de piel, vejiga, pulmón y riñón, así como también con enfermedades del corazón (Hite, 2013). En el caso específico de los niños, el As puede provocar retraso en el crecimiento, incremento de la presión sanguínea y compromiso en la función renal (Gardner et al., 2013; Hawkesworth et al., 2013). Dentro de la producción de granos, el mayor problema se presenta en el arroz (Meharg et al., 2009; EFSA, 2009; FAO-WHO, 2012), ya que la planta absorbe y asimila hasta 10 veces más As que otros cereales, convirtiéndose en una de las principales fuentes de As en la dieta de la población (Williams et al., 2005; Meharg et al., 2009; Tuli et al., 2010; Gilbert-Diamond et al., 2011). Por otro lado, el contenido de metales pesados, incluido el As, en el arroz, varía con el tipo de suelo, pH, manejo del agua, suministro de fertilizantes y variedades genéticas de la planta (Kumarathilaka et al., 2018).

Regulación y normativas

En los últimos años, los problemas por sustancias o elementos peligrosos en los alimentos han empezado a tomar una mayor relevancia debido a las mayores exigencias de inocuidad de los alimentos y a que las agencias reguladoras de los países y el comercio internacional son cada vez más estrictas para resguardar la salud de la población (Meharg et al., 2009). En consecuencia, algunas organizaciones internacionales, como La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), y el Comité Mixto de Expertos (JECFA), establece una ingesta diaria tolerable (TDI) para el As, Cd, Pb y Hg, de 50; 1; 3,6 y 0,7 µg kg^{-1} de peso corporal, respectivamente (WHO, 2000). Además, la ingesta semanal tolerable provisional (ISTP) establecida para Cd, Pb y Hg alcanza a 7, 25 y 5 µg kg^{-1} de peso corporal, respectivamente (WHO, 1988). En el Cuadro 2 se indican rangos de concentración de metales en la dieta de países del mundo. Sin embargo, en Chile no existe una normativa que regule los límites máximos de metales pesados en arroz, como lo establecen otros países (EFSA, 2009) y como recomienda la FAO/OMS (FAO/WHO, 2012) que fijan estrictas normativas para la presencia de niveles máximos de As inorgánico en arroz blanco, integral y arroz para consumo infantil (200, 400 y 100 µg kg^{-1}, respectivamente).

En Chile, el Reglamento Sanitario de los Alimentos, Decreto Supremo N°977/96, señala que los elementos como cereales, legumbres y leguminosas, no deberán sobrepasar los niveles de As (500 µg kg^{-1}), Hg (50 µg kg^{-1}) y Pb (500 µg kg^{-1}), no existiendo información para el caso del Cd. Específicamente, en el caso del arroz, el Reglamento Sanitario de los Alimentos (Decreto Supremo N°977/96) señala que el límite máximo de arsénico en arroz pulido no podrá sobrepasar los 0,20 mg kg^{-1} de As total.

Respecto al agua de riego, la Norma Chilena Oficial NCH 1333 (INN, 1987) indica que las concentraciones máximas de los elementos químicos en agua para riego son: As (0,10 mg L^{-1}), Cd (0,01 mg L^{-1}), Hg (0,001 mg L^{-1}), Pb (5,0 mg L^{-1}). En suelos agrícolas, la Normativa Chilena vigente NCh 2952c (INN, 2004) indica que el límite máximo permitido para metales pesados es 20 mg kg^{-1}. Sin embargo, no existe una norma específica que establezca límites permitidos de estos elementos en el grano de arroz y sus derivados.

Cuadro 2. Ingesta diaria promedio estimada de metales pesados en base a datos recopilados en la literatura para una persona de 60 kg.

País	Consumo arroz (kg año^{-1} cápita^{-1})	As MEDI (µg d^{-1} kg^{-1} pc)	As % TDI	Cd MEDI (µg d^{-1} kg^{-1} pc)	Cd % TDI	Pb MEDI (µg d^{-1} kg^{-1} pc)	Pb % TDI
Australia	21,6	0,1	0,2	0,02	1,87	0,02	0,49
Bangladesh	215,3	1,0	1,9	0,19	18,68	0,18	4,92
China	95,4	0,4	0,9	0,08	8,28	0,08	2,18
India	79,0	0,4	0,7	0,07	6,85	0,06	1,80
Indonesia	161,4	0,7	1,5	0,14	14,00	0,13	3,68
Japón	61,6	0,3	0,6	0,05	5,34	0,05	1,41
Malasia	95,9	0,4	0,9	0,08	8,32	0,08	2,19
Birmania	227,0	1,0	2,1	0,20	19,69	0,19	5,18
Pakistán	15,2	0,1	0,1	0,01	1,32	0,01	0,35
Filipinas	128,1	0,6	1,2	0,11	11,11	0,11	2,92
Corea del Sur	93,0	0,4	0,8	0,08	8,07	0,08	2,12
Taiwán	46,0	0,2	0,4	0,04	3,99	0,04	1,05
Tailandia	165,0	0,7	1,5	0,14	14,32	0,14	3,77
Vietnam	217,4	1,0	2,0	0,19	18,86	0,18	4,96
Unión Europea	6,0	0,1	0,1	0,00	0,30	0,00	0,08
Emiratos Árabes	80,0	0,3	0,5	0,08	8,40	0,34	9,44
Egipto	42,1	0,1	0,3	0,04	4,42	0,18	4,97
Irán	49,8	0,2	0,3	0,05	5,23	0,21	5,87
Irak	43,2	0,1	0,3	0,05	4,54	0,18	5,10
Arabia Saudita	46,1	0,1	0,3	0,05	4,84	0,20	5,44
Turquía	8,8	0,0	0,1	0,01	0,92	0,04	1,04
Costa de Marfil	76,7	-	-	0,06	5,53	-	-
Nigeria	37,5	-	-	0,03	2,71	-	-
Sudáfrica	20,2	-	-	0,01	1,46	-	-
Canadá	11,3	0,1	0,2	0,01	1,34	0,01	0,16
México	8,7	0,1	0,2	0,01	1,31	0,00	0,10
EE.UU.	14,0	0,1	0,3	0,02	1,66	0,01	0,20
Argentina	8,0	0,1	0,2	0,01	1,21	0,00	0,09
Uruguay	32,7	0,4	0,9	0,05	4,93	0,01	0,37

MEDI: Medio; TDI: ingesta diaria tolerable; pc: peso corporal. Fuente: Jallad, 2015.

Factores que influyen en el contenido de metales pesados y arsénico en el grano de arroz

Existen diversas medidas agronómicas que pueden ser usadas para minimizar la biodisponibilidad de As y otros metales en el suelo y, por lo tanto, su acumulación en la planta de arroz, aunque se requieren más estudios para probar su efectividad y reproducibilidad. Estas medidas incluyen parámetros fisicoquímicos del suelo como: concentración de estos elementos en el suelo, estado redox, concentración y tipo de hidróxidos de Fe poco cristalinos, P disponible, textura, pH, silicio (Si) disponible y azufre (S) (Cheng et al., 2004; Bogdan y Schenk, 2009; Zhao et al., 2010; Fu et

al., 2011; Amaral et al., 2017). Además, durante las últimas décadas se han desarrollado otros métodos, como proporcionar fuentes alternativas de riego y/o estrategias de manejo del agua de riego, aplicación de biosorbentes, fitorremediación, uso de suelos recuperados, selección de variedades genéticas de arroz, los cuales también tienen influencia en el contenido de As y metales en la planta y grano de arroz (Suriyagoda et al., 2018).

Fertilización

Existe un amplio número de trabajos que indican un potencial de reducción en la absorción y acumulación de As mediante la aplicación de fertilizantes inorgánicos y orgánicos (compost), los cuales pueden inmovilizar, adsorber o co-precipitar el As *in situ*. Particularmente, la competencia entre el fosfato y el As (V) debido a sus similitudes químicas, se ha descrito a menudo en la literatura (Sadiq, 1997; Bogdan y Schenk, 2009). El fosfato puede desplazar al As (V) desde los sitios de unión en el suelo y, por lo tanto, aumentar la disponibilidad de As y la absorción por las plantas (Peryea, 1991; Sadiq, 1997). Por otro lado, las plantas absorben fosfato y As (V) por los mismos canales transportadores (Ullrich-Eberius et al., 1989; Meharg y Macnair, 1992). Por ello, en suelos con una alta concentración de P disponible para la planta, la competencia entre As (V) y P por los transportadores de fosfato en las raíces, disminuiría la absorción de As y su concentración y contenido en la planta (Meharg y Macnair, 1990; Jiang et al., 2014). Además, una alta concentración interna de P induce la regulación a la baja de los transportadores de P, lo que conduce a la supresión de una mayor absorción de As (Finnegan y Chen, 2012). Se ha descrito en varios reportes científicos una reducción en la toxicidad de As o en la concentración de As en el grano con el aumento en la concentración de P total y/o disponible en el suelo para diferentes cultivos de arroz, regiones y/o condiciones de crecimiento (Wang y Duan, 2009; Lu et al., 2010; Fu et al., 2011; Lou-Hing et al., 2011; Rahaman et al., 2011; Talukder et al., 2012; Jiang et al., 2014; Suriyagoda et al., 2018). Sin embargo, estudios realizados en el extranjero, indican que aplicaciones a largo plazo de fertilizantes fosfatados, pueden contribuir a aumentar elementos trazas tales como As, Cd y Pb en cultivos, lo que dependería de la calidad (pureza) del fertilizante aplicado. Además, la acumulación de los elementos trazas fue limitada y localizada (Jiao et al., 2012; Hartley et al., 2013).

En general, el manejo de P en los suelos para reducir la acumulación de As en el grano de arroz, se debe realizar con cuidado, ya que un aumento de P en el suelo resultaría en una disminución en la solubilidad, biodisponibilidad, absorción y acumulación de As en el grano. Por otro lado, en suelos con una adecuada concentración inicial de P y/o con una baja disponibilidad de As, un aumento adicional en la concentración de P en el suelo aumentaría la concentración de P en la rizósfera y provocaría una regulación a la baja de los transportadores de P y, por lo tanto, una mayor competencia entre As y P, lo que conduce a la planta a reducir la absorción y acumulación de As en el grano (Suriyagoda et al., 2018).

Con respecto a la productividad, el rendimiento en función de la aplicación de fertilizantes fosfatados, por lo general, aumenta junto con el incremento de la dosis de fertilizante.

Manejo del agua

El manejo de agua utilizada en los campos de arroz es un importante regulador de la cantidad y forma de As y metales disponibles para las plantas de arroz (Rahaman et al., 2011; Hua et al., 2013; Ma et al., 2014; Hu et al., 2015; Newbigging et al., 2015; Das et al., 2016; Norton et al., 2017; Wu et al., 2017). En los últimos años, el cultivo de arroz bajo condiciones de riego aeróbicas, intermitentes y con suelo saturado, presenta un menor contenido de As en la planta comparado con el sistema convencional-inundado que se utiliza normalmente. Sin embargo, esta conclusión debe ser evaluada también en el contexto productivo, debido a que el rendimiento

del arroz en condiciones aeróbicas resulta, en algunos casos, en una reducción importante del rendimiento en grano, comparado con los otros sistemas de riego. Cabe destacar que se debería evaluar el efecto en otros metales, como el Cd, que podría presentar un efecto opuesto sobre la especiación y biodisponibilidad en la planta (Xu et al., 2008; Li et al., 2009; Arao et al., 2009; Deng et al., 2010; Somenahally et al., 2011; Talukder et al., 2011; 2012; Sarkar et al., 2012; Spanu et al., 2012; Ma et al., 2014; Moreno-Jiménez et al., 2014; Hu et al., 2015; Linquist et al., 2015; Das et al., 2016; LaHue et al., 2016; Carrijo et al., 2017). También se ha informado que, en comparación con el As en el suelo, el As disponible a través del riego muestra una fuerte relación con la especiación de As en varias partes de la planta. Según, Sarkar et al. (2012), el uso de riego intermitente sólo en la etapa vegetativa es mejor, ya que en sus experimentos observaron una reducción en la concentración de As en la cáscara y grano de arroz en 23 % y 33 %, respectivamente, en comparación con el riego continuo y sin una disminución en el rendimiento del grano. Por otro lado, se debe considerar que la disminución de los niveles de As en condiciones de riego intermitente e inundado, está relacionado a factores como el potencial redox del suelo, baja concentración de As (III) en el suelo, disminución en la abundancia relativa de As, bacterias reductoras de Fe y S, aumento en la abundancia relativa de As, bacterias oxidantes de Fe y S, y formación de placas de Fe que unen el As (III) y As (V) a la superficie de la raíz del arroz (Deng et al., 2010; Deng y Kim, 2016).

Variabilidad genética

Varios estudios indican que diferentes variedades de arroz, presentan diferentes tasas de absorción y acumulación de As, reportándose diferencias significativas tanto entre variedades de arroz como en la ubicación geográfica donde éste se cultiva (Norton et al., 2009; Meharg et al., 2009; Khan et al., 2010; Pillai et al., 2010; Rauf et al., 2011; Hua et al., 2011; Hu et al., 2013; Kuramata et al., 2013; Sommella et al., 2013). Recientemente, Punshon et al. (2017) y Suriyagoda et al. (2018) revisaron los mecanismos de absorción y translocación de As y la resistencia de las plantas, para acumular As en el grano de arroz. Las variedades de arroz con mayor porosidad radicular, pérdida de oxígeno radial, o la formación de placas de Fe que se unen a As, reducen la absorción de As (Pan et al., 2014; Suriyagoda et al., 2018). El uso de estas variedades de arroz es de gran importancia para los cultivos inundados, ya que la pérdida de oxígeno radial es el mecanismo clave para oxidar la rizósfera, inducir la formación de placas de Fe y transformar el As (III) en As (V) poco soluble. Varios mecanismos están asociados con la translocación de As a granos de arroz, entre ellos la reducción mediada por glutatión/glutaredoxina y la complejación y el secuestro dependiente de fitoquelatinas en vacuolas que dan como resultado una menor translocación de As a los granos de arroz. Además, la generación de especies reactivas de oxígeno y la producción de enzimas antioxidantes, reducen aún más la toxicidad del As (es decir, la resistencia al As) (Finnegan y Chen, 2012; Suriyagoda et al., 2018). Por lo tanto, la concentración de As en la planta de arroz disminuye en el siguiente orden: raíces > hojas > granos. Estos mecanismos de bloqueo y resistencia al As son afectados por las interacciones de manejo, el ambiente y variedades. En forma más específica, un estudio realizado por Zhang et al. (2008) en 3.000 accesiones de arroz provenientes de diferentes partes del mundo, permitió detectar la presencia de un amplio número de loci asociados a la presencia de As, Cu, Zn y Mo en el grano de arroz, además de localizar genes candidatos relacionados con la absorción y transporte de estos elementos. La diversidad genética en la acumulación de As y otros elementos en la planta de arroz, permitiría, por ejemplo, la selección continua de genotipos de arroz que absorben menos As y metales (Cheng et al., 2006). Por lo tanto, la selección de variedades para reducir la carga de As en los granos de arroz es un proceso complejo debido a la existencia de amplias variaciones en las condiciones del suelo, las prácticas de manejo adoptadas por los agricultores y la disponibilidad de recursos.

Conclusiones

El nivel de consumo de arroz por la población y la concentración de As y metales en el grano, contribuyen a altos o bajos niveles de ingesta diaria de metales tóxicos.

A nivel mundial, la concentración de As y metales pesados varía en los diferentes tipos de suelos y regiones geográficas de los arrozales. Debido a que el arroz se cultiva principalmente en condiciones de riego sumergidas o inundadas, existe una mayor biodisponibilidad de As, con un aumento en la proporción de formas tóxicas y reducidas de As inorgánico y orgánico.

Las condiciones del suelo sumergido, el pH reducido del suelo, las bajas concentraciones de P, Fe, Mn y Si en el suelo, y la adición de materia orgánica, aumentan la biodisponibilidad de As en las plantas de arroz en la mayoría de los casos. Por lo tanto, el adecuado control de los factores antes mencionados, mas la implementación del riego intermitente y la selección de variedades de arroz adecuadas, son estrategias que permitirán reducir la biodisponibilidad de As y metales en el suelo, y su absorción por las plantas de arroz.

Referencias

Al-Saleh, I., Abduljabbar, M. 2017. Heavy metals (lead, cadmium, methylmercury, arsenic) in commonly imported rice grains (*Oryza sativa*) sold in Saudi Arabia and their potential health risk. Int. J. Hyg. Environ. Health 220:1168-1178.

Amaral, D.C., Lopes, G., Guilherme, L.R.G., et al. 2017. A new approach to sampling intact Fe plaque reveals Si-induced changes in Fe mineral composition and shoot As in rice. Environ. Sci. Technol. 51:38-45.

Arao, T., Kawasaki, A., Baba, K., et al. 2009. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice. Environ. Sci. Technol. 43:9361-9367.

Bogdan, K., Schenk, M.K. 2009. Evaluation of soil characteristics potentially affecting arsenic concentration in paddy rice (*Oryza sativa* L.) Environ. Pollut. 157:2617-2621.

Carrijo, D.R., Lundy, M.E., Linquist, B.A. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. Field Crops Res. 203:173-180.

Chen, H., Tang, Z., Wang, P., et al. 2018. Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice. Environ. Pollut. 238:482-490.

Cheng, W.D., Zhang, G.P., Yao, H.G., et al. 2004. Possibility of predicting heavy-metal contents in rice grains based on DTPA-extracted levels in soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 35:2731-2745.

Cheng, W., Zhang, G., Yao, H., et al. 2006. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, arsenic, nickel and lead concentrations in rice grains. J. Zhejiang Univ. Sci. B. 7:565-571.

Das, S., Chou, M.L., Jean, J.S., et al. 2016. Water management impacts on arsenic behavior and rhizosphere bacterial communities and activities in a rice agro-ecosystem. Sci. Total Environ. 542:642-652.

Deng, B.L., Kim, E.S. 2016. Co-adsorption of trichloroethylene and arsenate by iron-impregnated granular activated carbon. Water Environ. Res. 88:394-402.

Deng, D., Wu, S.C., Wu, F.Y., et al. 2010. Effects of root anatomy and Fe plaque on arsenic uptake by rice seedlings grown in solution culture. Environ. Pollut. 158:2589-2595.

EFSA. 2009. European Food Safety Authority (EFSA). Panel on Contaminants in the Food Chain. Scientific opinion on arsenic in food. EFSA J. 7:1351-1550.

FAO/WHO. 2012. Food standards programme, codex committee on contaminants in foods. Proposed draft maximum levels for arsenic in rice. CX/CF 12/6/8. FAO/World Health Organization (WHO), Rome, Italy.

Farías, S.S., Londonio, A., Quintero, C., et al. 2015. On-line speciation and quantification of four arsenical species in rice samples collected in Argentina using a HPLC-HG-AFS coupling. Microchem. J. 120:34-39.

Finnegan, P.M., Chen, W.H. 2012. Arsenic toxicity: The effects on plant metabolism. Front. Physiol. 3:182.

Fu, Y.R., Chen, M.L., Bi, X.Y., et al. 2011. Occurrence of arsenic in brown rice and its relationship to soil properties from Hainan Island, China. Environ. Pollut. 159:1757-1762.

Fu, Q.L., Li, L., Achal, V., et al. 2015. Concentrations of heavy metals and arsenic in market rice grain and their potential health risks to the population of Fuzhou, China. Hum. Ecol. Risk Assess. 21:117-128.

Gardner, R.M., Kippler, M., Tofail, F., et al. 2013. Environmental exposures to metals and children's growth to five years: a prospective cohort study. Am. J. Epidemiol. 177(12):1356-1367.

Gilbert-Diamond, D., Cottingham, K.L., Gruber, J.F., et al. 2011. Rice consumption contributes to arsenic exposure in US women. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 108:20656-20660.

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

Guillod-Magnin, R., Brüschweiler, B.J., Aubert, R., et al. 2018. Arsenic species in rice and rice-based products consumed by toddlers in Switzerland. Food Addit. Contam. Part A 35:1164-1178.

Hartley, T.N., Macdonald, A.J., Mc Grath, S.P.M., et al. 2013. Historical arsenic contamination of soil due to long-term phosphate fertilizer applications. Environ. Pollut. 180:259-264.

Hawkesworth, S., Wagatsuma, Y., Kippler, M., et al. 2013. Early exposure to toxic metals has a limited effect on blood pressure or kidney function in later childhood, rural Bangladesh. Int. J. Epidemiol. 42:176-185.

Hite, A.H. 2013. Arsenic and rice: a call for regulation. Nutrition 29:353-354.

Hu, P., Huang, J., Ouyang, Y., et al. 2013. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars. Environ. Geochem. Health 35:767-778.

Hu, P.J., Ouyang, Y.N., Wu, L.H., et al. 2015. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar. J. Environ. Sci. 27:225-231.

Hua, B., Yan, W., Wang, J., et al. 2011. Arsenic accumulation in rice grains: Effects of cultivars and water management practices. Environ. Eng. Sci. 28:591-596.

Hua, B., Yan, W.G., Yang, J. 2013. Response of rice genotype to straight head disease as influenced by arsenic level and water management practices in soil. Sci. Total Environ. 442:432-436.

INN. 1987. Norma Chilena Oficial 1333 Of. 78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2004. Norma uso de lodos y Norma chilena Compost-Clasificación y requisitos. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

Jallad, K.N. 2015. Heavy metal exposure from ingesting rice and its related potential hazardous health risks to humans. Environ. Sci. Pollut. Res. 22:15449-15458.

Jarup, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. Br. Med. Bull. 68:167-182.

Jiang, W., Hou, Q.Y., Yang, Z.F., et al. 2014. Evaluation of potential effects of soil available phosphorus on soil arsenic availability and paddy rice inorganic arsenic content. Environ. Pollut. 188:159-165.

Jiao, W., Chen, W., Chang, A., et al. 2012. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizer applications: a review. Environ. Pollut. 168:44-53.

Jung, M.Y. 2018. Inorganic arsenic contents in infant rice powders and infant rice snacks marketed in Korea determined by a highly sensitive gas chromatography-tandem mass spectrometry following derivatization with British Anti-Lewisite. Food Sci. Biotechnol. 27:617-622.

Keshavarzi, B., Moore, F., Ansari, M., et al. 2015. Macronutrients and trace metals in soil and food crops of Isfahan Province, Iran. Environ. Monit. Assess. 187:4113.

Khan, M.A., Islam, M.R., Panaullah, G.M., et al. 2010. Accumulation of arsenic in soil and rice under wetland condition in Bangladesh. Plant Soil 333:263-274.

Kumarathilaka, P., Seneweera, S., Meharg, A., et al. 2018. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) is influenced by environment and genetic factors. Sci. Total Environ. 642:485-496.

Kuramata, M., Abe, T., Kawasaki, A., et al. 2013. Genetic diversity of arsenic accumulation in rice and QTL analysis of methylated arsenic in rice grains. Rice 6:3.

LaHue, G.T., Chaney, R.L., Adviento-Borbe, M.A., et al. 2016. Alternate wetting and drying in high yielding direct seeded rice systems accomplishes multiple environmental and agronomic objectives. Agric. Ecosyst. Environ. 229:30-39.

Li, R.Y., Ago, Y., Liu, W.J., et al. 2009. The rice aquaporin *Lsi*1 mediates uptake of methylated arsenic species. Plant Physiol. 150:2071-2080.

Linquist, B.A., Anders, M.M., Adviento-Borbe, M.A.A., et al. 2015. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. Global Change Biol. 21:407-417.

Liu, Z., Zhang, Q., Han, T., et al. 2016. Heavy metal pollution in a soil-rice system in the Yangtze river region of China. Int. J. Environ. Res. Public Health 13(1):63.

Lou-Hing, D., Zhang, B., Price, A.H., et al. 2011. Effects of phosphate on arsenate and arsenite sensitivity in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars of different sensitivity. Environ. Exp. Bot. 72:47-52.

Lu, Y., Dong, F., Deacon, C., et al. 2010. Arsenic accumulation and phosphorus status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China. Environ. Pollut. 158:1536-1541.

Ma, R., Shen, J.L., Wu, J.S., et al. 2014. Impact of agronomic practices on arsenic accumulation and speciation in rice grain. Environ. Pollut. 194:217-223.

Meharg, A.A., Macnair, M.R. 1990. An altered phosphate uptake system in arsenate-tolerant *Holcus lanatus* L. New Phytol. 116:29-35.

Meharg, A.A., Macnair, M.R. 1992. Suppression of the high affinity phosphate uptake system: A mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus* L. J. Exp. Bot. 43:519-524.

Meharg, A., Williams, P.N., Adomako, E., et al. 2009. Geographical variation in total and inorganic arsenic content of polished (white) rice. Environ. Sci. Technol. 43:1612-1617.

Moreno-Jiménez, E., Meharg, A.A., Smolders, E., et al. 2014. Sprinkler irrigation of rice fields reduces grain arsenic but enhances cadmium. Sci. Total Environ. 485-486:468-473.

Newbigging, A.M., Paliwoda, R.E., Le, X.C. 2015. Rice: Reducing arsenic content by controlling water irrigation. J. Environ. Sci. 30:129-131.

Norton, G.J., Duan, G., Dasgupta, T., et al. 2009. Environmental and genetic control of arsenic accumulation and speciation in rice grain: comparing a range of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China, and India. Environ. Sci. Technol. 43:8381-8386.

Norton, G.J., Shafaei, M., Travis, A.J., et al. 2017. Impact of alternate wetting and drying on rice physiology, grain production, and grain quality. Field Crops Res. 205:1-13.

Nunes, L.M., Otero, X. 2017. Quantification of health risks in Ecuadorian population due to dietary ingestion of arsenic in rice. Environ. Sci. Pollut. Res. 24:27457-27468.

Orisakwe, O.E., Nduka, J.K., Amadi, C.N., et al. 2012. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of food crops and fruits in Owerri, South Eastern, Nigeria. Chem. Cent. J. 6:77.

Pan, W.S., Wu, C., Xue, S.G., et al. 2014. Arsenic dynamics in the rhizosphere and its sequestration on rice roots as affected by root oxidation. J. Environ. Sci. 26:892-899.

Peryea, F.J. 1991. Phosphate-induced release of arsenic from soils contaminated with lead arsenate. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:1301-1306.

Pillai, T.R., Yan, W.G., Agrama, H.A., et al. 2010. Total grain-arsenic and arsenic-species concentrations in diverse rice cultivars under flooded conditions. Crop Sci. 50:2065-2075.

Punshon, T., Jackson, B.P., Meharg, A.A., et al. 2017. Understanding arsenic dynamics in agronomic systems to predict and prevent uptake by crop plants. Sci. Total Environ. 581-582:209-220.

Rahaman, S., Sinha, A.C., Mukhopadhyay, D. 2011. Effect of water regimes and organic matters on transport of arsenic in summer rice (*Oryza sativa* L.). J. Environ. Sci. 23:633-639.

Rauf, M.A., Hakim, M.A., Hanafi, M.M., et al. 2011. Bioaccumulation of arsenic (As) and phosphorus by transplanting Aman rice in arsenic-contaminated clay soils. Aust. J. Crop Sci. 5:1678-1684.

Sadiq, M. 1997. Arsenic chemistry in soils: An overview of thermodynamic predictions and field observations. Water Air Soil Pollut. 93:117-136.

Sarkar, S., Basu, B., Kundu, C.K., et al. 2012. Deficit irrigation: An option to mitigate arsenic load of rice grain in West Bengal, India. Agric. Ecosyst. Environ. 146:147-152.

Segura, F.R., de Oliveira, J.M., De Paula, E.S., et al. 2016. Arsenic speciation in Brazilian rice grains organically and traditionally cultivated: Is there any difference in arsenic content? Food Res. Int. 89:169-176.

Somenahally, A.C., Hollister, E.B., Loeppert, R.H., et al. 2011. Microbial communities in rice rhizosphere altered by intermittent and continuous flooding in fields with long-term arsenic application. Soil Biol. Biochem. 43:1220-1228.

Sommella, A., Deacon, C., Norton, G., et al. 2013. Total arsenic, inorganic arsenic, and other elements concentrations in Italian rice grain varies with origin and type. Environ. Pollut. 181:38-43.

Spanu, A., Daga, L., Orlandoni, A.M., et al. 2012. The role of irrigation techniques in arsenic bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.) Environ. Sci. Technol. 46:8333-8340.

Suriyagoda, L.D.B., Dittert, K., Lambers, H. 2018. Arsenic in rice soils and potential agronomic mitigation strategies to reduce arsenic bioavailability: A review. Pedosphere 28:363-382.

Talukder, A.S.M.H.M., Meisner, C.A., Sarkar, M.A.R., et al. 2011. Effect of water management, tillage options and phosphorus status on arsenic uptake in rice. Ecotoxicol. Environ. Saf. 74:834-839.

Talukder, A.S.M.H.M., Meisner, C.A., Sarkar, M.A.R., et al. 2012. Effect of water management, arsenic and phosphorus levels on rice in a high-arsenic soil-water system: II. Arsenic uptake. Ecotoxicol. Environ. Saf. 80:145-151.

Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., et al. 2012. Heavy metal toxicity and the environment. Exp. Suppl. 101:133-164.

Tuli, R., Chakrabarty, D., Trivedi, P.K., et al. 2010. Recent advances in arsenic accumulation and metabolism in rice. Mol. Breed. 26:307-323.

Ullrich-Eberius, C.I., Sanz, A., Novacky, A.J. 1989. Evaluation of arsenate- and vanadate-associated changes of electrical membrane potential and phosphate transport in *Lemna gibba* G1. J. Exp. Bot. 40:119-128.

Wang, L.H., Duan, G.L. 2009. Effect of external and internal phosphate status on arsenic toxicity and accumulation in rice seedlings. J. Environ. Sci. 21:346-351.

WHO. 1988. Arsenic. Joint Expert WHO/FAO Expert Committee on Food Additives and Contaminants. Vol 24. Food Additives Series. World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.

WHO. 2000. Lead. In: Safety evaluation of certain food additives and contaminants. Fifty-third meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). WHO Food Additives Series Nr 44. World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.

Williams, P.N., Price, A.H., Raab, A., et al. 2005. Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. Environ. Sci. Technol. 39:5531-5540.

Wu, C., Huang, L., Xue, S.G., et al. 2017. Oxic and anoxic conditions affect arsenic (As) accumulation and arsenite transporter expression in rice. Chemosphere 168:969-975.

Xu, X.Y., McGrath, S.P., Meharg, A.A., et al. 2008. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. Environ. Sci. Technol. 42:5574-5579.

Zhang, X, Lin, A.J., Zhao, F.J., et al. 2008. Arsenic accumulation by the aquatic fern *Azolla*: Comparison of arsenate uptake, speciation and efflux by *A. caroliniana* and *A. filiculoides*. Environ. Pollut. 156:1149-1155.

Zhao, F.J., McGrath, S.P., Meharg, A.A. 2010. Arsenic as a food chain contaminant: Mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies. Annu. Rev. Plant Biol. 61:535-559.

Zhuang, P., McBride, M.B., Xia, H., et al. 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. Sci. Total Environ. 407:1551-1561.

Capítulo 27. Niveles de arsénico en arroz comercializado en Chile

Eimmy Ramírez M., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Yáñez S., Mario Paredes C., Viviana Becerra V.

El arsénico en el grano de arroz puede estar presente en distintas formas químicas, denominadas especies químicas elementales de arsénico, las cuales se clasifican en especies inorgánicas y orgánicas. Las especies de As inorgánicas (As_i) son principalmente As(III) y As(V), y las especies orgánicas (As_o) son principalmente el ácido monometilarsónico (MMA) y el ácido dimetilarsínico (DMA), existiendo varias otras especies de menor importancia. Estas cuatro especies químicas (As(III), As(V), MMA y DMA) comprenden alrededor del 90 % del contenido de As total, del cual entre el 60 % y 70 % está presente en forma de As inorgánico (Huang et al., 2012; Althobiti et al., 2018; Menon et al., 2020).

En términos de la toxicidad del arsénico, se establece que el arsénico inorgánico es aproximadamente 100 veces más tóxico que las especies orgánicas (DMA y MMA) (Signes-Pastor et al., 2016; Wang et al., 2015), ya que aumenta el riesgo de desarrollo de cáncer y enfermedades cardiovasculares (Hughes et al., 2011).

El año 2011 el Comité Mixto de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) reestudió y actualizó la dosis de referencia de ingesta diaria de As inorgánico (Benchmark Dose Lower Confidence Limit, $BMDL_{0.5}$) en 0,003 mg kg^{-1} de peso corporal por día (FAO/WHO, 2011). Esta nueva dosis de referencia bajó en 5 veces la hasta entonces vigente recomendación de ingesta semanal tolerable provisional (PTWI) de 0,015 mg kg^{-1} de peso corporal por día. Adicionalmente, el dictamen de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) identificó un rango de $BMDL_{0.1}$ (es decir, la dosis necesaria para un aumento del 0,1 % de varios tipos de cáncer y lesiones cutáneas) de As $inorgánico_i$ entre 0,0003 y 0,008 mg kg^{-1} de peso corporal por día (EFSA, 2009; 2014; Rintala et al., 2014; Guillod-Magnin et al., 2018; Jallad, 2019).

Considerando el mayor número de evidencias y conocimiento del riesgo asociado al consumo de alimentos con elevado contenido de arsénico, las agencias regulatorias internacionales y nacionales, tales como la FDA de U.S.A., EFSA de la Unión Europea, OMS y FAO de las Naciones Unidas, y la Agencia Chilena para la Inocuidad y Calidad Alimentaria (ACHIPIA), están siendo cada vez más estrictas en los límites máximos permitidos de arsénico en alimentos como el arroz, para resguardar la salud de la población. En específico, la Comisión Europea (EC, 2015) estableció los siguientes límites máximos permisibles para As inorgánico (As_i) en el arroz: (a) 0,20 mg kg^{-1} en arroz blanco o pulido; (b) 0,25 mg kg^{-1} en arroz descascarillado o integral y (c) 0,10 mg kg^{-1} en arroz destinado a producir alimentos para lactantes y niños pequeños. Del mismo modo, la Administración de Drogas y Alimentos de U.S.A. (US FDA, 2016; Signes-Pastor et al., 2016) ha limitado la concentración de As_i a 0,10 mg kg^{-1} en cereales de arroz para lactantes (Menon et al., 2020). En el caso de Chile, el Reglamento Sanitario de los Alimentos (Decreto Supremo N°977/96) especifica los límites máximos permitidos para As en arroz (Artículo N°160), el cual fue actualizado por el Decreto N°7 (2018) del Ministerio de Salud. Este señala que el límite máximo de arsénico en el producto final ´arroz pulido` no podrá sobrepasar los 0,20 mg kg^{-1} de As total. Con respecto al control de este máximo permitido, se indica que sólo será necesario determinar As_i, si la medición de As total supera este límite (0,20 mg kg^{-1}). Cabe destacar que aún no existe una norma específica que establezca límites permisibles de As en el grano de arroz integral y sus derivados para el consumo infantil. En este caso, sólo estaría vigente la normativa para arroz blanco (0,20 mg kg^{-1}), lo cual indica que es necesario normar estos productos.

Desde el punto de vista administrativo, en Chile ACHIPIA es la institución nacional encargada de generar y recopilar antecedentes para evaluar los riesgos del arsénico en el arroz, y generar una propuesta sobre límites máximos permisibles en productos derivados, tales como arroz integral y alimentos para infantes y celiacos.

Cuadro 1. Resumen de los límites máximos permisibles de arsénico inorgánico en arroz, establecidos por organismos reguladores internacionales y chileno (actualizado al 2020).

Norma/país	Arroz blanco	Arroz integral	Arroz para infantes
FAO/WHO	0,20 mg kg^{-1}	0,40 mg kg^{-1}	0,10 mg kg^{-1}
EFSA/UE	0,20 mg kg^{-1}	0,25 mg kg^{-1}	0,10 mg kg^{-1}
FDA/EEUU	0,10 mg kg^{-1}	Sin regulación específica*	0,10 mg kg^{-1}
MINSAL/Chile	** 0,20 mg kg^{-1}	Sin regulación específica*	Sin regulación específica*

*Sólo será necesario determinar As inorgánico, si la medición de As total supera este límite.
** Rige el límite máximo de arroz blanco o pulido.

Por otra parte, respecto al agua de riego, la Norma Chilena Oficial NCH 1333 indica que la concentración máxima de As en agua para riego es de 0,10 mg L^{-1}. En suelos agrícolas, la Normativa Chilena vigente NCh 2952c, 2004, indica que el límite máximo permitido para metales pesados es de 20 mg kg^{-1}(INN, 2004).

Cuadro 2. Resumen de los límites máximos permisibles de arsénico total e inorgánico a contrastar en muestras arroz, agua de riego y suelo (actualizado al 2020).

Muestras	Valor límite máximo permitido	Unidades
Arroz pulido	0,20	mg kg^{-1}
Arroz integral*	0,25	mg kg^{-1}
Suelo agrícola	20,00	mg kg^{-1}
Agua de riego	0,10	mg L^{-1}

*Se comparará con la concentración de As más baja (EFSA/UE).

Muestreo de la zona arrocera

En el marco de un proyecto Innova-Chile CORFO (15BP-45394, 2015-2017) que lideró el INIA Quilamapu en Chillán y co-ejecutó la Universidad de Concepción, se realizó una prospección de los niveles de arsénico contenidos en los granos de arroz, suelo y agua, en el sector arrocero de Chile.

El muestreo se realizó en las Regiones del Maule (comunas de Linares, Longaví, Parral y Retiro) y Ñuble (comunas de San Carlos y Ñiquén). La determinación del tamaño de muestra probabilística se planificó considerando un universo de 1.439 productores de arroz. Asumiendo un nivel de confianza de 95 % y un error aproximado de 6,5 %, el tamaño de la muestra alcanzó a 200 productores de arroz. En la Figura 1 se observa un mapa donde se indican los puntos muestreados en la temporada 2016 y 2017.

En cada punto de muestreo se tomaron muestras de granos de arroz, suelo superficial (0 - 15 cm de profundidad) y agua. Las muestras de agua fueron tomadas desde la lámina de agua de la

siembra en cada punto muestreado o, en su defecto, desde la fuente de agua (canal) más cercana al punto de muestreo. Las muestras de arroz paddy fueron procesadas en un molino de prueba, de acuerdo a las normas establecidas en el país. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio, bajo un sistema de custodia para asegurar su calidad y preservación.

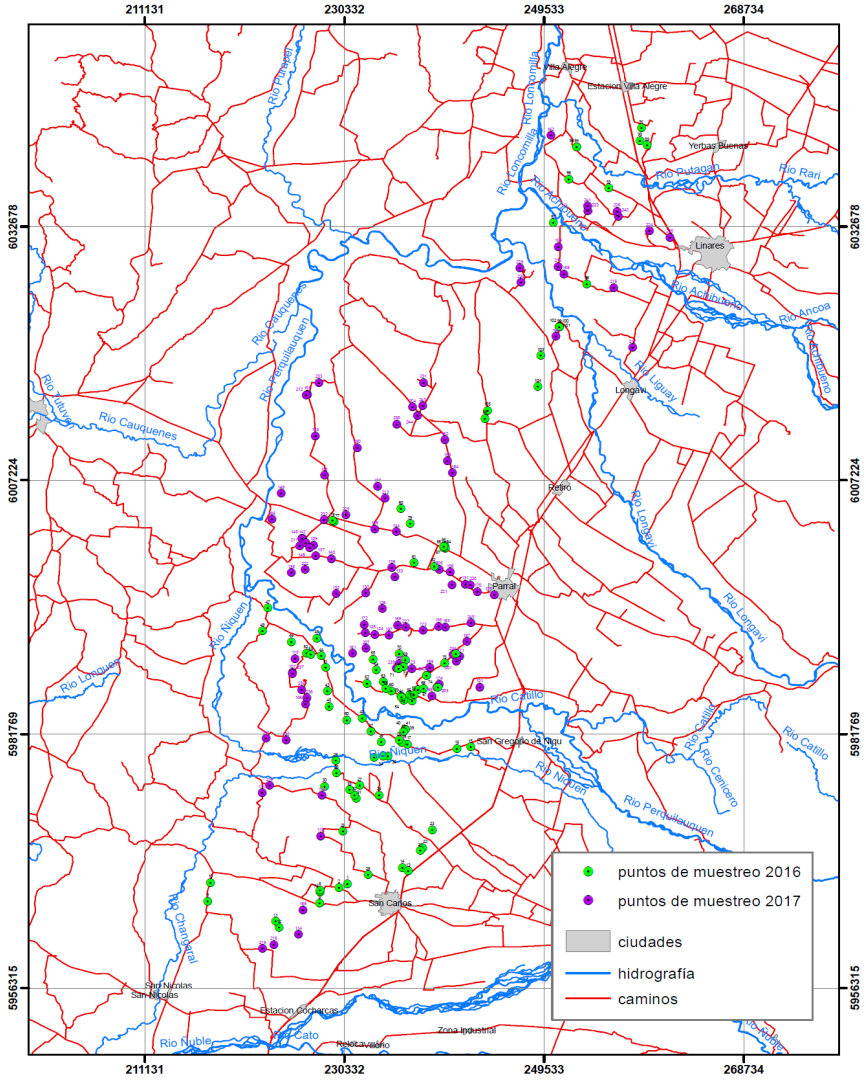


Figura 1. Mapa de zona arrocera. Puntos muestreados en 2016 (verde) y 2017 (violeta).

Concentración de arsénico total en arroz

La concentración promedio de As total y desviación estándar promedio de todas las muestras (N=201) de arroz colectadas durante 2016 y 2017, fue de 96 ± 52 µg kg^{-1}. Los valores de concentración de As en arroz por comunas fue de 101 ± 60 µg kg^{-1} en Linares (N=21), 110 ± 57 µg kg^{-1} en Retiro (N=12), 99 ± 67 µg kg^{-1} en Longaví (N=12), 109 ± 51 µg Kg^{-1} en Parral (N=91), 62 ± 35 µg kg^{-1} en San Carlos (N=33) y 85 ± 41 µg kg^{-1} en Ñiquén (N=32). En la Figura 2 se observa en detalle el rango de concentración de As total (puntos coloreados) para cada punto muestreado. En las muestras analizadas, ningún valor de As total excede el límite máximo de 200 µg kg^{-1} de As inorgánico para el arroz blanco elaborado (pulido), recomendado por la Comisión del Codex Alimentarius (2014), organismo internacional coordinado por la OMS y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Para verificar la exactitud y precisión de los resultados, se usaron materiales de referencia certificados. En los análisis realizados se utilizó el material de referencia, SRM 1568b Rice Flour, certificado del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST). La cuantificación de arsénico total se realizó mediante espectrometría de fluorescencia atómica (AFS), acoplado a un sistema de generación de hidruros (Lumina 3300 Aurora Instruments).

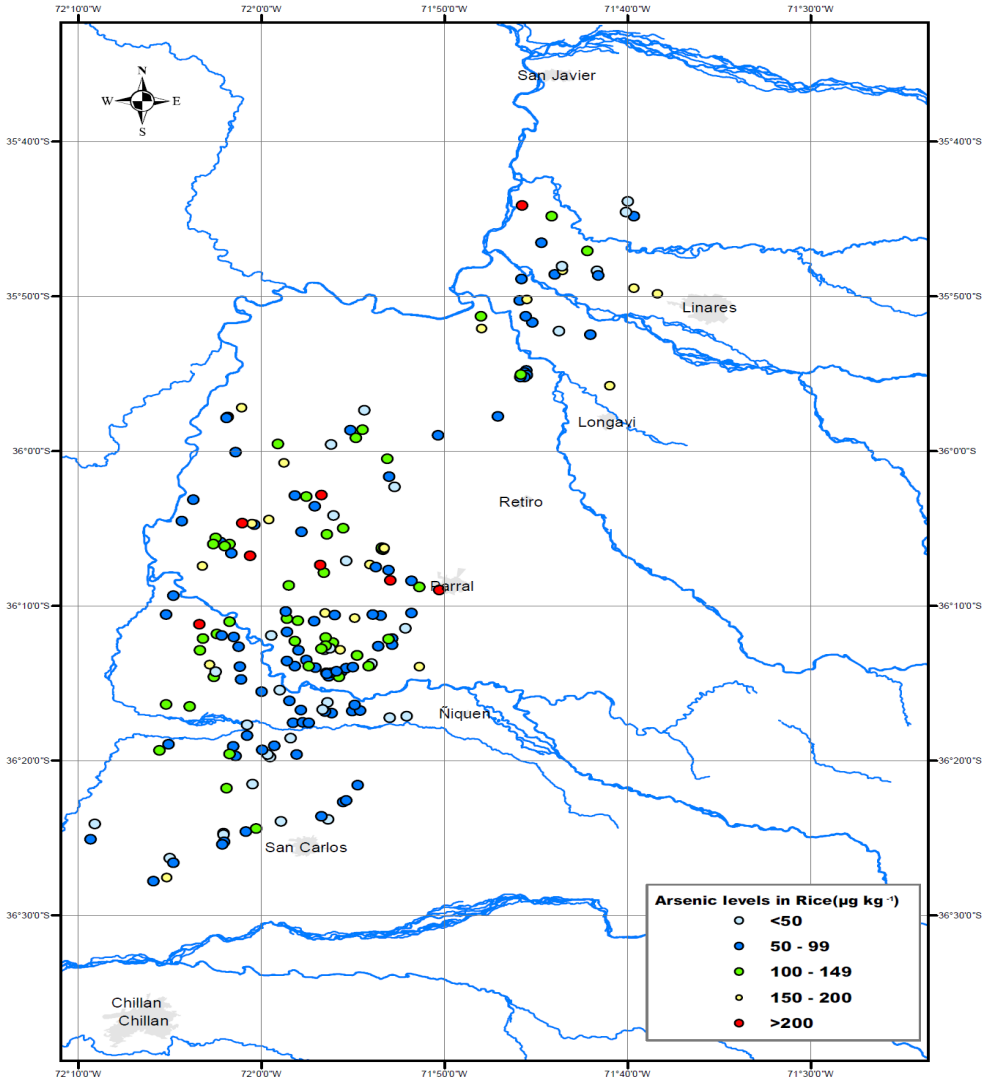


Figura 2. Mapa con la distribución de la concentración de As total (µg kg^{-1}) evaluado en muestras de arroz de la zona arrocera de Chile. Año 2016 y 2017.

Arsénico en suelos arroceros del país

La concentración promedio de As total y desviación estándar para el total de las muestras (N=193) de suelo colectadas en 2016 y 2017, fue de 5,7 ± 2,4 mg kg^{-1}. En los suelos arroceros la concentración promedio y desviación estándar de As total por comunas fue de 3 ± 2 mg kg^{-1} en Linares (N=18), 4,0 ± 1,6 mg kg^{-1} en Retiro (N=14), 5,0 ± 0,9 mg kg^{-1} en Longaví (N=8), 5,0 ± 2,5 mg kg^{-1} en Parral (N=86), 8 ± 2,6 mg kg^{-1} en San Carlos (N=36) y 6 ± 2,8 mg kg^{-1} en Ñiquén (N=31). Para verifi-

car la exactitud y precisión del método de análisis, se usó material de referencia certificado. Para suelo el material de referencia es de la Comunidad Europea ERM-CC141 Loam Soil.

En la Figura 3 se observa en detalle el rango de concentración de As total (puntos coloreados) para cada muestra de suelo y punto muestreado. En los suelos analizados, no se encontraron muestras con concentraciones de As total que sobrepasarán el límite máximo permitido para suelos agrícolas, recomendado por la Normativa Chilena NCh 2952c-2004 (INN, 2004), la Normativa Europea, Directiva 86/278/EEC (Marmo, 2003) y la Normativa Australiana de 20 mg kg^{-1} (Standards Australia, 1999).

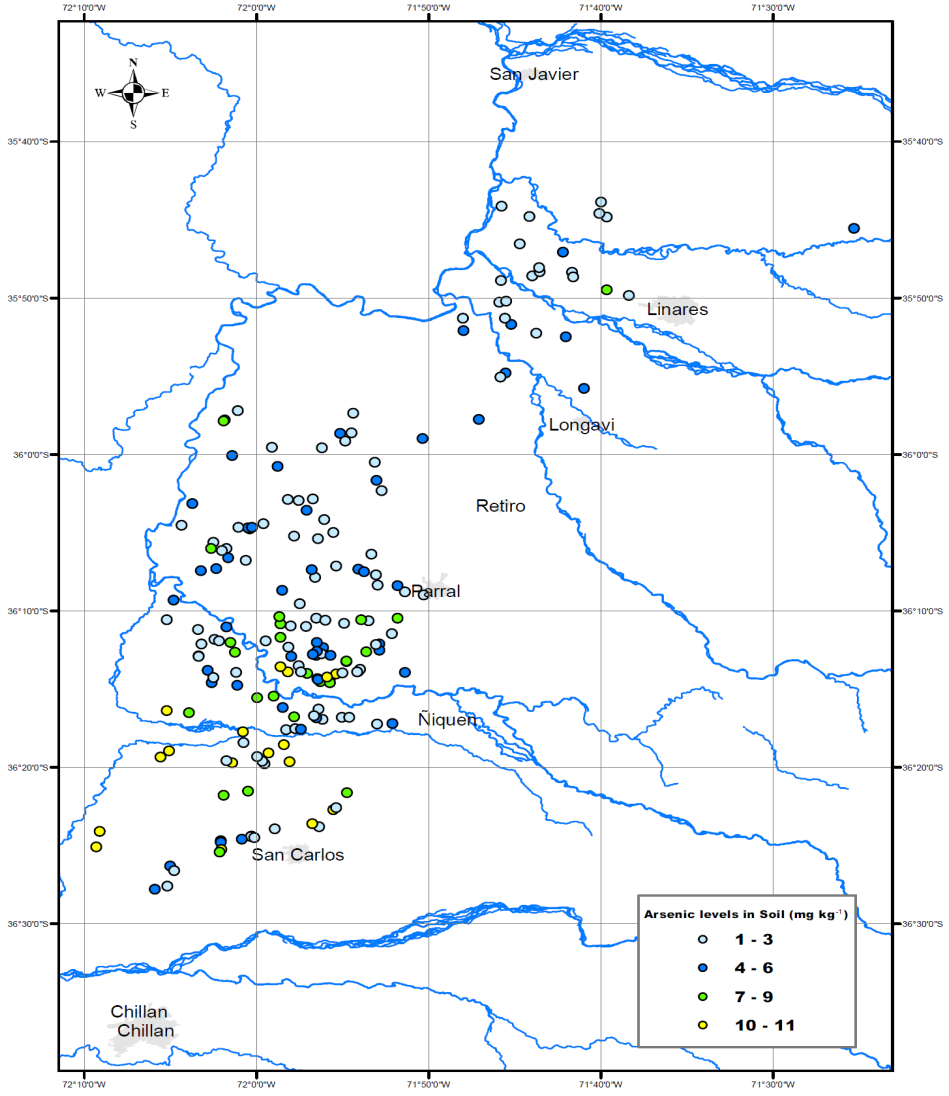


Figura 3. Mapa con la distribución de la concentración de As total (µg kg^{-1}) en muestras de suelos evaluadas en la zona arrocera de Chile. Año 2016 y 2017.

Arsénico en agua de riego en arrozales del país

La concentración promedio de As total y desviación estándar para todas las muestras (N=188) de agua colectadas en el 2016 y 2017, fue de 1,2 ± 1,0 µg L^{-1}, respectivamente. En el agua de riego la concentración promedio y desviación estándar de As total por comunas fue de 0,8 ± 0,7 µg L^{-1} en Linares (N=14), 1,6 ± 1,6 µg L^{-1} en Retiro (N=11), 1 ± 0,6 µg L^{-1} en Longaví (N=12), 1,2 ± 0,9 µg L^{-1} en Parral (N=90), 1,3 ± 1,1 µg L^{-1} en San Carlos (N=31) y 1,2 ± 1,6 µg L^{-1} en Ñiquén (N=30). En la Figura 4 se observa en detalle el rango de concentración de As total (puntos coloreados) para cada muestra de agua y punto muestreado. La exactitud y precisión de los resultados se comprobó con materiales de referencia certificados. Para agua se usó el material del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST) SRM 1640a Trace Elements in Natural Water.

Los resultados de As total obtenidos en las muestras de agua se encuentran muy por debajo del límite máximo permisible de As total para agua de riego, fijado en 100 µg L^{-1} por la Norma Chilena Oficial, NCh 1333 (INN, 1987), y de la concentración de As total recomendada para agua potable establecida por la Norma Chilena NCh 409 (INN, 2005), la Unión Europea (EU, 1998) y la Organización Mundial de la Salud de 10 µg L^{-1} (WHO, 2003).

Las concentraciones de As en aguas de regadío no parecen incidir en las diferencias de los niveles de As en arroz, al menos en los rangos obtenidos en las cosechas del 2016 y 2017 que fueron bastante estrechos.

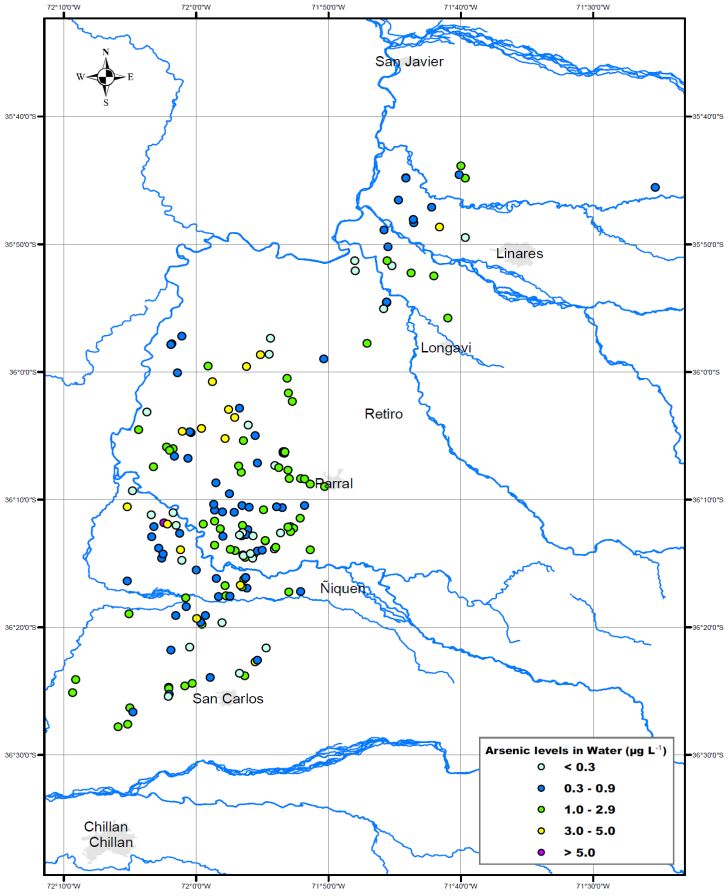


Figura 4. Mapa con la distribución de la concentración de As total (µg kg^{-1}) en muestras de agua de riego de la zona arrocera del país. Año 2016 y 2017.

Concentración de arsénico inorgánico en arroz

La especiación de arsénico inorgánico (As^{III} y As^{V}), se cuantificó por HPLC (Flexar LC pump, Perkin Elmer) acoplada al HG-AFS. Para la separación cromatográfica se utilizó una precolumna (11,2 mm, 12-20 µm Hamilton, Reno, NV, U.S.A.) y una columna de intercambio aniónico PRP-X100 de 5 µm (250 x 4,6 mm, Hamilton). La fase móvil consistió de hidrofosfato de amonio 6,7 mM ($NH_4H_2PO_4$) y nitrato de amonio 6,7 mM (NH_4NO_3), ajustado a pH 6,2 utilizando amoniaco al 3 %. El tiempo de retención para la especie As se determinó utilizando una combinación de estándares de 50 µg L^{-1} con las especies de arsenito, arsenato, DMA y MMA (material de referencia de NIST, SRM 1568b Rice Flour). En la Figura 5 se observan los valores de concentración de As inorgánico y total (µg kg^{-1}). En las muestras seleccionadas se encontró un valor promedio de As inorgánico de 47 µg kg^{-1}, concentración que cumple con la normativa internacional vigente, y un valor de 104 µg kg^{-1} de As total. Se concluye que, aproximadamente, el 54 % de As total contenido en las muestras corresponde a As inorgánico.

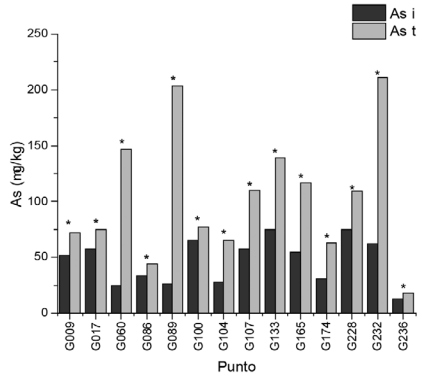


Figura 5. Concentraciones de As inorgánico (As_i) y As total (As_t) en arroz, muestreados en la zona arrocera de Chile. Temporada 2016 - 2017. El asterisco (*) indica diferencias significativas entre niveles de arsénico total e inorgánico, dentro de las muestras ($P<0,05$).

Conclusiones

El análisis de las muestras de arroz tomadas en la zona arrocera del país, durante la temporada 2015-2016 y 2016-2017, indicó un valor promedio de As inorgánico de 47 µg kg^{-1}, concentración que cumple con la normativa nacional e internacional vigente. En los suelos analizados no se encontraron muestras con concentraciones de As total que sobrepasen el límite máximo permitido para suelos agrícolas recomendado por la normativa chilena vigente, la europea y australiana de 20 mg kg^{-1} (Standars Australia, 1999). Asimismo, los resultados de As total obtenidos en las muestras de agua de riego, se encontraban muy por debajo del límite máximo permisible de As total para agua de riego, fijado en 100 µg L^{-1} (INN, 1987) y de la concentración de As total recomendada para agua potable establecida por la normativa chilena vigente (INN, 2005), la Unión Europea (CEC, 1986; EU, 1998) y la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003) de 10 µg L^{-1}.

Referencias

Althobiti, R.A., Sadiq, N.W., Beauchemin, B. 2018. Realistic risk assessment of arsenic in rice. Food Chem. 257:230-236.

CEC, Council of the European Communities. 1986. On the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986. Official Journal of the European Communities L 181/6-12.

EC. 2015. Amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of inorganic arsenic in foodstuffs. Commission Regulation (EU) 2015/1006 of 25 June 2015. European

Commission (EU), Brussels, Belgium. Official Journal of the European Union L 161/14-16.

EFSA. 2009. Scientific opinion on arsenic in food. EFSA panel on the contaminants in the food chain. European Food Safety Authority (EFSA), Parma, Italy. EFSA J. 7(10):1351.

EFSA. 2014. Dietary exposure to inorganic arsenic in the European population. European Food Safety Authority (EFSA), Parma, Italy. EFSA J. 12(3):3597.

EU. 1998. On the quality of water intended for human consumption. Directive 98/83/EC of the European Parliament and of the Council of 3 November 1998. Council of the European Union, Brussels, Belgium. Official Journal of the European Union L 330/32, 5/12/1998.

FAO/WHO. 2011. Safety evaluation of certain contaminants in food. In: Seventy-second Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.

Guillod-Magnin, R., Bruschweiler, B.J., Aubert, R., et al. 2018. Arsenic species in rice and rice-based products consumed by toddlers in Switzerland. Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess. 35(6):1164-1178.

Huang, J.-H., Fecher, P., Ilgen, G., et al. 2012. Speciation of arsenite and arsenate in rice grain – Verification of nitric acid based extraction method and mass sample survey. Food Chem. 130:453-459.

Hughes, M.F., Beck, B.D., Chen, Y., et al. 2011. Arsenic exposure and toxicology: A historical perspective. Toxicol. Sci. 123(2):305-332.

INN. 1987. Norma Chilena Oficial 1333 Of. 78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Norma Chilena Oficial NCh 1333. https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh1333-1978_Mod-1987.pdf. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2004. Norma uso de lodos y norma chilena compost- clasificación y requisitos. Norma Chilena Oficial NCh 2952c-2004. https://vdocuments.site/norma-chilena-29522004-22-03-2105.html. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2005. Norma Chilena Oficial 409/1. Of 2005, Agua Potable Parte1: Requisitos Norma Chilena Oficial NCh 409-2005. https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh409.pdf. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

Jallad, K.N. 2019. The hazards of a ubiquitary metalloid, arsenic, hiding in infant diets: detection, speciation, exposure, and risk assessment. Biol. Trace Elem. Res. 190:11-23.

Marmo, I. 2003. Heavy metals in the context of EU policies on soil and waste. European Commission, DG Environment.

Menon, M., Sarkarb, B., Huftona, J., et al. 2020. Do arsenic levels in rice pose a health risk to the UK population? Ecotoxicol. Environ. Saf. 197:110601.

Rintala, E.M., Ekholm, P., Koivisto, P., et al. 2014. The intake of inorganic arsenic from long grain rice and rice-based baby food in Finland – low safety margin warrants follow up. Food Chem. 150: 199–205.

Signes-Pastor, A.J., Carey, M., Meharg, A.A. 2016. Inorganic arsenic in rice-based products for infants and young children. Food Chem. 191:128–134.

Standards Australia. 1999. AS 4454-1999. Composts, soil conditioners and mulches. Standards Australia, Sydney, NSW, Australia.

US FDA. 2016. Questions & Answers: Arsenic in rice and rice products. United States Food and Drug Administration (US FDA), Silver Spring, Maryland, USA.

Wang, X., Peng, B., Tan, C., et al. 2015. Recent advances in arsenic bioavailability, transport, and speciation in rice. Environ. Sci. Pollut. Res. 22:5742–5750.

WHO. 2003. Reference document for the development of WHO guidelines for drinking water quality. WHO/SDE/WSH/03.04/75. World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.

Capítulo 28. Concentración de arsénico en arroz con diferentes manejos agronómicos

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Jorge Yáñez S., Eimmy Ramírez M.

Es de extrema importancia determinar con certeza la inocuidad del arroz producido en Chile y definir las estrategias agrícolas que permitan reducir los niveles existentes de metales pesados en arroz.

Existen factores agronómicos detectados que influyen en la presencia de arsénico en el grano de arroz. Entre ellos están: el suelo (material parental, potencial redox, pH, materia orgánica y otros minerales); el agua (riego aeróbico, intermitente *vs.* suelo saturado); la fertilización (sílice, fosfato, NPK); y el genotipo (*japonica* tropical y *japonica* templado absorben menos que otros tipos de arroz).

Fertilización fosfatada

El fósforo favorece el crecimiento radical y, por tanto, mejora la absorción de agua y otros nutrientes. La mayor absorción de P se presenta durante el período de desarrollo vegetativo y se reduce después de la formación de la panícula. El fosfato y el arseniato son análogos y pueden combinarse en los mismos sitios en las partículas del suelo. La fertilización con fosfato, comúnmente tiene dos consecuencias. La primera es el aumento del movimiento descendente del As que resulta en un aumento de la lixiviación desde la capa superficial del suelo; la segunda es una mayor accesibilidad de As en la solución del suelo, dado que la toxicidad en los cultivos puede prevalecer en situaciones donde la contaminación por As coexiste con un P disponible bajo (Abedi y Mojiri, 2020).

Aunque estudios realizados en el extranjero indican que, en el largo plazo, el impacto de las aplicaciones de fertilizantes fosfatados sobre la acumulación de elementos trazas ha sido limitada y localizada (Jiao et al., 2012), y estuvo asociado a la calidad del fertilizante aplicado (Hartley et al., 2013), la gran mayoría de los estudios indican que la fertilización (independiente del tipo) reduce la concentración de arsénico en el grano.

Agua

El manejo del agua también tiene influencia en el contenido de arsénico en la planta. En general, los sistemas de riego aeróbico, intermitentes y en suelos saturados presentan un menor contenido de arsénico en la planta, comparado con el sistema convencional-inundado que se utiliza normalmente en el cultivo del arroz (Xu et al., 2008; Li et al., 2009; Sarkar et al., 2012; Hu et al., 2013; Donoso et al., 2015; Paredes et al., 2015). Sin embargo, esta conclusión también debe ser evaluada en el contexto productivo, debido a que en condiciones aeróbicas genera, en algunos casos, una reducción importante del rendimiento en grano, comparado con los otros sistemas de riego (Li et al., 2009; Peng et al., 2006; Sarkar et al., 2012).

Absorción de arsénico en arroz bajo diferentes concentraciones de fósforo

Dentro del Proyecto Innova Chile se evaluaron prácticas agronómicas que podrían reducir el nivel de arsénico presente en el grano y, de esta manera, obtener un arroz más inocuo para la salud de la población. Para ello, se realizó un ensayo en el Campo Experimental de Arroz de INIA en San

Carlos, con diferentes variedades y líneas experimentales INIA, para determinar la existencia de una absorción diferencial de arsénico debido al genotipo. Las variedades fueron fertilizadas con diferentes unidades de fósforo (superfosfato triple) correspondientes a 0, 60, 120 y 180 kg ha^{-1}.

En general, los resultados mostraron que las diferentes dosis de fósforo influyeron en la absorción de arsénico en la planta y, por ende, en su contenido en el grano de arroz (Figura 1). La concentración promedio de As total en el grano de arroz disminuyó en forma sostenida en la medida que se aumentó la dosis de fósforo, registrándose como concentración más elevada 62 ± 14 µg kg^{-1} en la parcela control (sin adición de fósforo), mientras que la menor concentración alcanzó 15 ± 14 µg kg^{-1}, cuando se aplicaron 180 kg ha^{-1} (Figura 1).

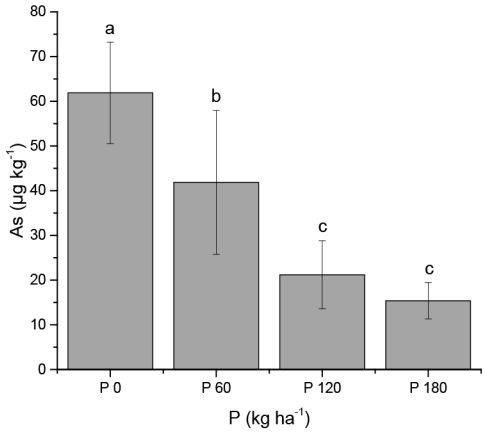


Figura 1. Concentraciones de arsénico total (µg kg^{-1}) en muestras de arroz, bajo diferentes dosis de fósforo (kg P_5O_4 ha^{-1}) ($P < 0,05$).

Arsénico total absorbido por genotipos fertilizados con cuatro tratamientos de fósforo en el suelo

Los resultados indican una respuesta diferencial de las variedades de arroz en su absorción de arsénico en el grano, bajo diferentes niveles de fósforo aplicados al suelo (Foto 1, Figura 2).

Las variedades de arroz que acumularon más As en relación al fosfato aplicado fueron:

1. P 0: sin adición de fósforo, el genotipo Quila 208904 (86 ± 11 µg kg^{-1}), ´Platino-INIA` (82 ± 14 µg $kg^{-1}$) y ´Diamante-INIA` (75 ± 15 µg kg^{-1}).
2. P 60: con la dosis de fósforo de 60 kg ha^{-1}, el genotipo Quila 208904 (70 ± 8 µg kg^{-1}) y ´Platino-INIA` (51 ± 15 µg kg^{-1}).
3. P 120: con la dosis de fósforo de 120 kg ha^{-1}, la línea experimental Cl-4 (40 ± 7 µg kg^{-1}) y Quila 208904 (38 ± 12 µg kg^{-1}).
4. P 180: con la dosis de fósforo de 180 kg ha^{-1}, la línea experimental Cl-12 (36 ± 4 µg kg^{-1}) y Cl-4 (26 ± 6 µg kg^{-1}).

Por otro lado, las líneas experimentales y variedades de arroz que acumularon menos As fueron:

1. P 0: sin adición de fósforo, las líneas experimentales Cl-12 (41 ± 9 µg kg^{-1}), y Cl-15 (49 ± 10 µg kg^{-1}).
2. P 60: con la dosis de fósforo de 60 kg ha^{-1}, las variedades ´Diamante-INIA` (22 ± 15 µg $kg^{-1}$), ´Cuarzo-INIA` (32 ± 19 µg kg^{-1}), y la línea experimental Cl-12 (34 ± 7 µg kg^{-1}).

3. P 120: con la dosis de fósforo de 120 kg ha^{-1}, las variedades ´Cuarzo-INIA` (9 ± 2 µg $kg^{-1}$), ´Brillante-INIA` (13 ± 9 µg kg^{-1}) y la línea experimental Cl-12 (14 ± 8 µg kg^{-1}).

4. P 180: con la dosis de fósforo de 180 kg ha^{-1}, la variedad ´Diamante-INIA` (4 ± 1 µg $kg^{-1}$), Quila 208904 (4 ± 4 µg $kg^{-1}$), ´Cuarzo-INIA` (7 ± 2 µg kg^{-1}) y ´Platino-INIA` (8 ± 3 µg kg^{-1}).

Foto 1. Variedades y líneas experimentales bajo diferentes niveles de fertilización fosfatada. Temporada 2015-2016.

Los niveles de arsénico total en los granos de arroz, para todos los genotipos evaluados, fueron mayores cuando no se aplicó fósforo (P=0). Por otro lado, todos los genotipos, con excepción de la línea experimental Cl-12, presentaron menor nivel de arsénico total, a medida que se aumentó la dosis a 60, 120 y 180 kg de P ha^{-1}, medido en µg kg^{-1} (Figura 2).

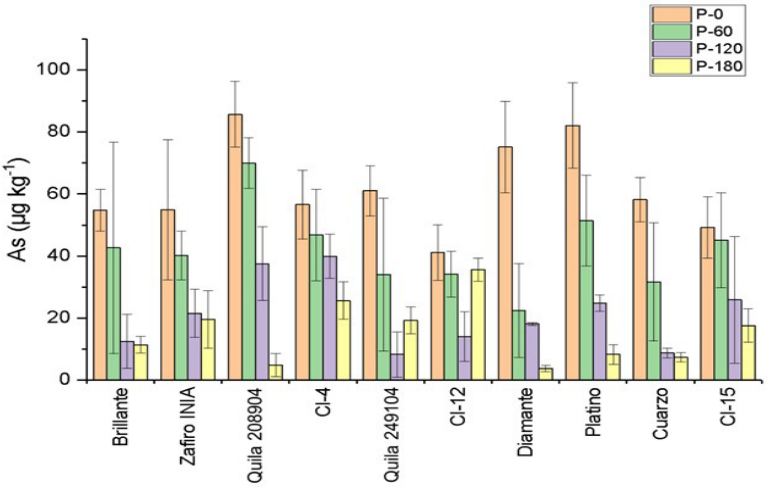


Figura 2. Concentraciones de arsénico total (µg kg^{-1}) en variedades comerciales y líneas experimentales de arroz, bajo diferentes dosis de fósforo (kg P_5O_4 ha^{-1}).

Existe un amplio número de trabajos que indican un potencial de reducción en la absorción y acumulación de arsénico mediante la aplicación de fertilizantes inorgánicos y orgánicos (compost), los cuales pueden inmovilizar, adsorber o co-precipitar el arsénico *in situ*. Sin embargo, las aplicaciones de fósforo por un largo tiempo, pueden contribuir a aumentar elementos trazas de

arsénico, cadmio y plomo en cultivos, lo que depende de la calidad (pureza) del fertilizante aplicado (Jiao et al., 2012; Hartley et al., 2013). Por otra parte, algunos estudios indican que diferentes variedades de arroz presentan diferentes tasas de absorción y acumulación de As, reportándose diferencias significativas, tanto entre variedades de arroz, como en la ubicación geográfica donde éste se cultiva (Norton et al., 2009; Meharg et al., 2009; Khan et al., 2010; Pillai et al., 2010; Rauf et al., 2011; Hua et al., 2011; Hu et al., 2013; Kuramata et al., 2013; Sommella et al., 2013).

Concentraciones de arsénico en arroz bajo diferentes sistemas de riego

Para evaluar el efecto del manejo del agua en la acumulación de arsénico en la planta, se analizaron 20 genotipos de arroz en los campos experimentales en San Carlos y Parral. Los genotipos fueron evaluados bajo diferentes sistemas de siembra y sistemas de riego: a) semilla pregerminada sobre una lámina de agua de 5 cm y el cultivo inundado desde siembra a cosecha; b) siembra en seco, riego a capacidad de campo desde el establecimiento y crecimiento vegetativo, e inundado desde la etapa R1 hasta madurez fisiológica. La humedad del suelo se controló mediante sensores Watermark (Modelo 200SS, U.S.A.), ubicados en cada parcela.

Los resultados indicaron que las condiciones de riego influyeron en la absorción de As por la planta y su acumulación en el grano de arroz. Es así como, el riego inundado muestra concentraciones promedio de As total más elevadas en el cultivo, con 60 ± 13 µg kg^{-1} en San Carlos y 65 ± 17 µg kg^{-1} en Parral. Por otro lado, la concentración de As total fue más baja cuando el cultivo se regó sin inundación o con riego intermitente, observándose valores de 44 ± 18 µg kg^{-1} en San Carlos y 57 ± 23 µg kg^{-1} en Parral (Figura 3).

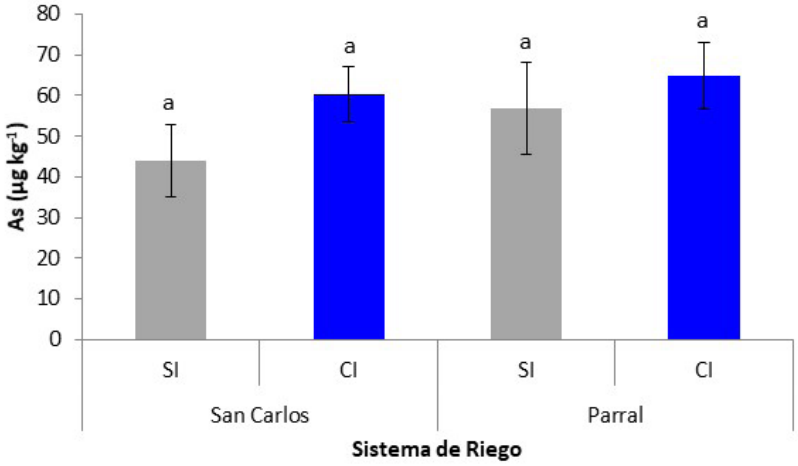


Figura 3. Concentraciones promedio de As total bajo diferentes condiciones de riego y en dos comunas (San Carlos y Parral). SI: sin inundar, CI: con inundación ($P < 0,05$).

Efecto varietal y riego sobre la absorción de arsénico

Las variedades de arroz utilizadas también presentaron diferencias en su capacidad de acumulación de As en el grano, considerando el riego y la localidad (Figura 4). En San Carlos, las variedades que acumularon más As bajo el sistema de inundación fueron ´Platino-INIA` (81 ± 47 µg $kg^{-1}$), ´Digua CI` (73 ± 43 µg kg^{-1}), ´Oro` (70 ± 19 µg $kg^{-1}$) y ´Ámbar-INIA` (69 ± 19 µg kg^{-1}). Mientras que en el riego intermitente (SI) fueron ´Platino-INIA` (72 ± 25 µg $kg^{-1}$) y ´Digua CI` (57 ± 26 µg kg^{-1}).

Por el contrario, las líneas experimentales y variedades que acumularon menos As en siembra con riego con inundación fueron BC4-4 (37 ± 38 µg kg^{-1}) y BC4-12 (46 ± 26 µg kg^{-1}) y en el riego intermitente fue ´Oro` (5 ± 16 µg kg^{-1}).

En Parral, las variedades y líneas experimentales que acumularon más As bajo riego con inundación fueron ´Cuarzo-INIA` (104 ± 17 µg $kg^{-1}$) y BC4-4 (76 ± 22 µg $kg^{-1}$) y bajo condiciones de riego intermitente fueron BC4-12 (107 ± 14 µg $kg^{-1}$) y ´Digua Cl` (81 ± 25 µg kg^{-1}).

Mientras que, en la misma comuna de Parral, las variedades que acumularon menos As bajo riego con inundación fueron ´Zafiro-INIA` (47 ± 26 µg $kg^{-1}$), ´Brillante-INIA` (50 ± 12 µg kg^{-1}) y ´Platino-INIA` (53 ± 29 µg $kg^{-1}$), mientras que para riego intermitente fueron ´Oro` (34 ± 14 µg kg^{-1}) y ´Zafiro-INIA` (39 ± 15 µg kg^{-1}).

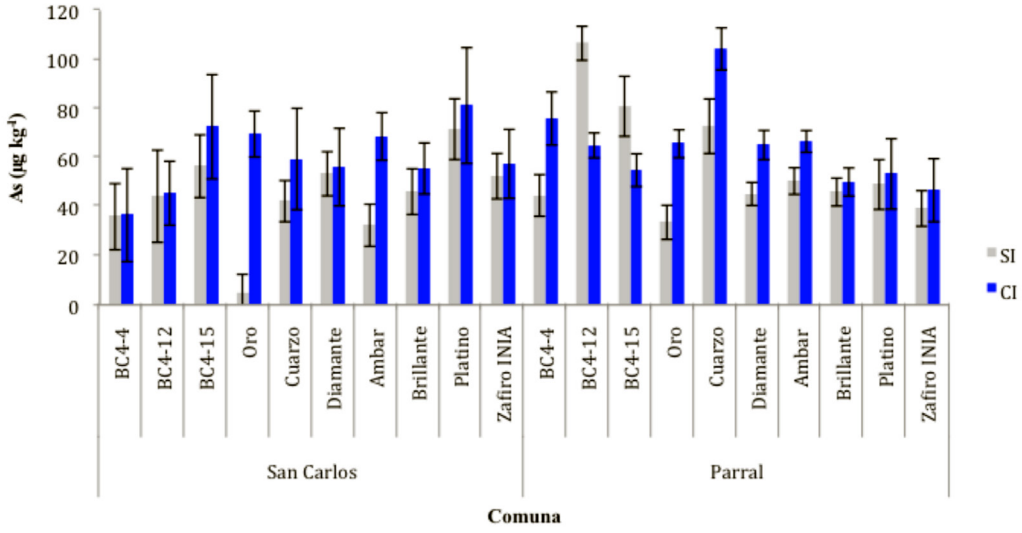


Figura 4. Concentraciones de As total en muestras de variedades comerciales y líneas experimentales de arroz, bajo diferentes condiciones de riego y en dos comunas (San Carlos y Parral). SI: sin inundar, CI: lámina de agua.

Conclusiones

Los niveles de arsénico total reportados en granos de arroz de variedades chilenas (96 ± 52 µg kg^{-1}) son comparativamente bajos y cumplen con la normativa internacional (OMS) para arsénico inorgánico en grano de arroz pulido (~ 47 µg kg^{-1} Chile) que establece una concentración máxima de 200 µg kg^{-1}. También cumple con las normativas de otros países (UE, U.S.A. y China). Las prácticas agrícolas, como el aumento de la dosis de fertilizante (fósforo), disminuye la absorción de As en granos de arroz en un 32 % 66 % y 76,0 % con dosis de 60, 120 y 180 kg P_5O_4 ha^{-1}, respectivamente. Las condiciones de riego igualmente influyen en la absorción de As en la planta y grano de arroz, disminuyendo la acumulación de As en un 36 % y 14 % promedio en los ensayos realizados con sistema de riego sin inundación en las comunas de San Carlos y Parral. Las variedades de arroz ´Diamante-INIA`, ´Cuarzo-INIA` y ´Platino-INIA`, presentaron las menores concentraciones de As total (≥ 8 µg $kg^{-1}$) en grano a la mayor dosis de fósforo aplicado. Por otra parte, en los ensayos realizados con riego sin inundación, las menores concentraciones de As se presentaron en la variedad ´Oro` en la comuna de San Carlos (5 µg kg^{-1}) y en las variedades ´Oro` y ´Zafiro-INIA` en la comuna de Parral (≥ 39 µg kg^{-1}).

Referencias

Abedi, T., Mojiri, A. 2020. Arsenic uptake and accumulation mechanism in rice species. Plants (Basel) 9(2):129.

Donoso, G., Paredes, M., Uribe, H., et al. 2015. Manejo del agua: Alcances y desafíos. p. 59-61. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hartley, T.N., Macdonald, A.J., Mc Grath, S.P.M., et al. 2013. Historical arsenic contamination of soil due to long-term phosphate fertilizer applications. Environ. Pollut. 180:259-264.

Hu, P., Huang, J., Ouyang, Y., et al. 2013. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars. Environ. Geochem. Health 35:767-778.

Hua, B., Yan, W., Wang, J., et al. 2011. Arsenic accumulation in rice grains: Effects of cultivars and water management practices. Environ. Eng. Sci. 28:591-596.

Jiao, W., Chen, W., Chang, A., et al. 2012. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizer applications: a review. Environ. Pollut. 168:44-53.

Khan, M.A., Islam, M.R., Panaullah, G.M., et al. 2010. Accumulation of arsenic in soil and rice under wetland condition in Bangladesh. Plant Soil 333:263-274.

Kuramata, M., Abe, T., Kawasaki, A., et al. 2013. Genetic diversity of arsenic accumulation in rice and QTL analysis of methylated arsenic in rice grains. Rice 6(1):3.

Li, R.Y., Ago, Y., Liu, W.J., et al. 2009. The rice aquaporin Lsi1 mediates uptake of methylated arsenic species. Plant Physiol. 150:2071-2080.

Meharg, A., Williams, P.N., Adomako, E., et al. 2009. Geographical variation in total and inorganic arsenic content of polished (white) rice. Environ. Sci. Technol. 43:1612-1617.

Norton, G.J., Duan, G., Dasgupta, T., et al. 2009. Environmental and genetic control of arsenic accumulation and speciation in rice grain: comparing a range of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China, and India. Environ. Sci. Technol. 43:8381-8386.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G. 2015. Evaluación de los niveles de arsénico en la zona arrocera del país. Algrano 2:19.

Peng, S., Bouman, B., Visperasm, R.M., et al. 2006. Comparison between aerobic and flooded rice in the tropics: Agronomic performance in an eight-season experiment. Field Crops Res. 96:252-259.

Pillai, T.R., Yan, W.G., Agrama, H.A., et al. 2010. Total grain-arsenic and arsenic-species concentrations in diverse rice cultivars under flooded conditions. Crop Sci. 50:2065-2075.

Rauf, M.A., Hakim, M.A., Hanafi, M.M., et al. 2011. Bioaccumulation of arsenic (As) and phosphorus by transplanting Aman rice in arsenic-contaminated clay soils. Aust. J. Crop Sci. 5:1678-1684.

Sarkar, S., Basu, B., Kundu, C.K., et al. 2012. Deficit irrigation: An option to mitigate arsenic load of rice grain in West Bengal, India. Agric. Ecosyst. Environ. 146:147-152.

Sommella, A., Deacon, C., Norton, G., et al. 2013. Total arsenic, inorganic arsenic, and other elements concentrations in Italian rice grain varies with origin and type. Environ. Pollut. 181:38-43.

Xu, X., McGrath, S.P., Meharg, A.A., et al. 2008. Growing aerobically markedly decreased arsenic accumulation. Environ. Sci. Technol. 42:5574-5579.

DR RC 32

SECCIÓN IX. SISTEMAS PRODUCTIVOS

Capítulo 29. Experiencia de la Fundación Chile (FCh) en la adaptación e implementación del Cropcheck para el cultivo del arroz (Ricecheck)

Mauricio Toro T.

El área Alimentos y Acuicultura de Fundación Chile (ex Agroindustria) tiene como misión transferir al sector agroindustrial, tecnologías innovadoras que contribuyan a incrementar la competitividad de las empresas del sector y las capacidades y competencias de sus participantes. En tal sentido y en reconocimiento al alto valor y potenciales aportes del modelo de extensión australiano Cropcheck al funcionamiento de los sistemas productivos agrícolas, que a partir del año 2003 se inició en Chile la coordinación para adaptar e instalar el sistema australiano en el cultivo del arroz, también llamado Ricecheck.

Fundación Chile introdujo la metodología Cropcheck desde Australia, a partir de un proyecto ejecutado en arroz en los años 2005 a 2007, a través de un convenio con el Departamento de Industrias Primarias de la Universidad de Nueva Gales del Sur (NSW Department of Primary Industries), que contó con la asesoría directa del Líder del Sistema del Ricecheck en Australia, Dr. John Lacy.

Por consiguiente, este capítulo corresponde a una recopilación respecto a la experiencia de la Fundación Chile (FCh) en la adaptación e implementación del Cropcheck en el país, especialmente en el cultivo del arroz o Ricecheck, desde el año 2003 al 2014.

Inicialmente el trabajo consistió en un ´proyecto piloto` con 20 agricultores medianos a grandes, proveedores de la agroindustria, en un comienzo Molinera San Cristóbal y luego Empresas Carozzi, cofinanciado por CORFO. Este trabajo contó con la base de un proyecto inicial de la Universidad de Talca cofinanciado por FIA y asesorado técnicamente por el Ingeniero de Ejecución Agrícola en sistemas arroceros Carlos Cisternas. La iniciativa ejecutada por la FCh, en conjunto con la agroindustria y asesorado técnicamente por el ex Jefe Agrícola de Empresas Carozzi, Gustavo Cobo e INIA Quilamapu, permitió la adaptación del modelo con la consiguiente definición de los elementos constitutivos del Cropcheck y la primera validación de los puntos de chequeo.

En paralelo se realizaron giras tecnológicas a Australia (segunda gira de la FCh) y California, con la participación de agricultores de este proyecto piloto. Seguidamente se desarrolló un programa de transferencia para el uso de herramientas tecnológicas de campo, como el uso de la carta de color para la estimación de nitrógeno en la planta de arroz, y elaboración y uso del rodillo arrocero para preparar la cama de semillas, ambas con la colaboración de la Universidad de California, Davis.

Entre los años 2007 a 2009 se concretó el trabajo financiado por INDAP Nivel Central, para dejar instalado el modelo en 100 agricultores arroceros del Programa de Asesoría Técnica – SAT, lo que arrojó resultados positivos a los productores. Posteriormente, entre los años 2011 a 2014, INDAP (financiamiento MINAGRI – INDAP) solicitó a la FCh integrar el programa Cropcheck al trabajo anual de las unidades operativas SAT de arroz de las Regiones del Maule y Biobío. De este modo, se produjo la adopción de la metodología Cropcheck, debido, principalmente, a la utilidad de la tecnología en el levantamiento y análisis de información productiva, alcanzándose impactos relevantes en aumentos de productividad en los productores atendidos por los SAT e INDAP.

Metodología Cropcheck

Antecedentes preliminares de la metodología Cropcheck

Desde el año 2003, FCh ha venido trabajando en la adecuación e implementación de la metodología de extensión Cropcheck en el país, fue desarrollada en el ´Yanco Agriculture Institute` de Australia, la que permite generar un sistema de extensión agrícola junto a la transferencia tecnológica en cultivos. Ello, a partir de la determinación de puntos de chequeo y su monitoreo a nivel predial, en función de metas específicas en rendimiento y calidad. Esto involucra todo el desarrollo del sistema agrícola, transversal al perfil del tamaño del agricultor. El levantamiento de los datos se consolida en una gran base de datos o ´Big Data`, de la cual se extrae información por medio del análisis de ´benchmarking` de los registros, con el objetivo de buscar las mejores prácticas de manejo a transferir, o mejorar las actuales. De esta forma, agricultores, asesores y otros agentes adquieren nuevos conocimientos y habilidades que pueden ser traducidos en mejores resultados productivos a través del entendimiento causa/efecto.

En el marco del programa de implementación del Cropcheck para el programa del Servicio de Asesoría Técnica predial de INDAP, el trabajo involucró a más de 33 asesores técnicos y de INDAP a 20 ejecutivos de fomento (evaluados cualitativamente y cuantitativamente en función de capacidades Cropcheck), con alrededor de 600 agricultores y 8.000 ha para el cultivo del arroz, en las Regiones de Maule y Biobío.

Descripción de la metodología Cropcheck

El Cropcheck es un sistema que se basa en la observación y monitoreo del cultivo en determinados puntos de chequeo, definidos como críticos, para alcanzar una meta en rendimiento o calidad. A partir del análisis de los resultados obtenidos en los puntos de chequeo, y de la comparación con los obtenidos por otros productores (´benchmarking`), los agricultores aprenden de su propia experiencia, y de la de otros, para ir gradualmente adoptando las mejores prácticas en el manejo de sus cultivos.

La implementación del Cropcheck involucra una activa participación de los productores, ya que requiere que se realicen metódicamente actividades de observación, medición, registro de datos, interpretación e implementación de acciones correctivas, todo lo cual permite identificar las fortalezas y debilidades del manejo agronómico del cultivo, y se traduce en lograr mejores resultados productivos. Los agricultores se organizan en ´grupos de discusión`, instancia en la que intercambian sus experiencias, reciben recomendaciones de manejo y aprenden los fundamentos de la metodología Cropcheck. Cada uno de estos grupos cuenta con la orientación de un ´coordinador`, quien desempeña diversas funciones fundamentales para el éxito de la metodología. Entre las principales funciones que realiza el coordinador está el entrenamiento y formación de los agricultores en el monitoreo de los puntos de chequeo, el análisis de los registros, la presentación del ´benchmarking` de los resultados obtenidos en las reuniones grupales y la entrega de recomendaciones técnicas de manejo de cultivo.

Puntos de chequeo de la metodología Cropcheck

Los puntos de chequeo son los principales componentes del Cropcheck. Son los manejos claves identificados como esenciales para lograr altos rendimientos o la meta establecida. A medida que los productores adoptan un mayor número de puntos de chequeo, mejores serán sus resultados productivos o más cerca estarán de la meta planteada. Por lo anterior, los puntos de chequeo se esquematizan como una escalera, ya que a medida que el agricultor los va cumpliendo se va avanzando hacia la meta (Figura 1).

Fuente: Fundación Chile.

Figura 1. Esquema del avance por puntos de chequeo a la meta establecida.

Los puntos de chequeo deben ser lo más simples y objetivos, y considerar resultados cuantificables y comparables. El propósito es que se permita una comunicación objetiva y clara entre productores. Esto se consigue a través de 5 atributos que deben cumplir los puntos de chequeo (Cuadro 1), y que se resumen en la sigla ´SMART` (inteligente en inglés).

Cuadro 1. Atributos para los puntos de chequeos de Ricecheck.

Específico – Ej. Nº de plantas
Medible – Ej. 280 – 360 plantas m^{-2}
Alcanzable –Ej. Real (no 600 plantas m^{-2})
Relevante – dentro del manejo del agricultor
Tiempo definido –Ej. 1^{era} macolla

Fuente: Fundación Chile.

En el Cuadro 2 se muestra un ejemplo de los puntos de chequeo identificados para el cultivo del arroz en Chile. Como se puede observar, hay 9 puntos de chequeo que se refieren a los momentos clave en el manejo del cultivo, donde se debe prestar especial atención para obtener la meta de rendimiento establecida. Para cada punto de chequeo se ha definido un indicador y un valor meta.

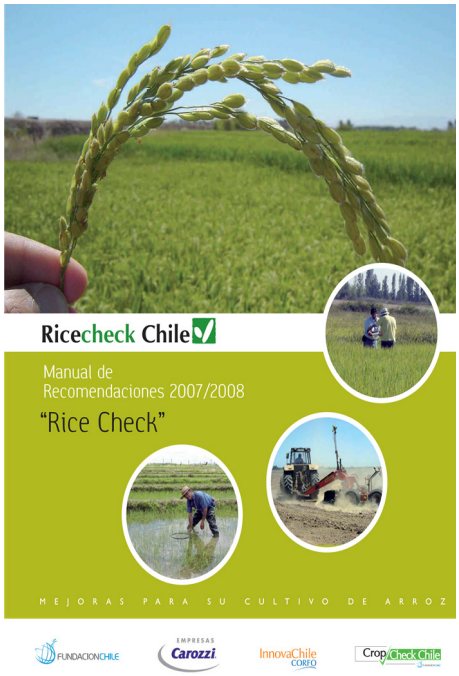
Cuadro 2. Ejemplo de los puntos de chequeo para arroz (2010).

Diseño y planificación del potrero		
PC 1	Altura de los pretiles y suelo nivelado.	Mida la altura de los pretiles antes de empezar la temporada. Considere, a lo menos, unos 40 cm. Esto le permitirá asegurar niveles de agua de unos 15 a 20 cm en los momentos de mayor sensibilidad al frío por parte del cultivo.
Establecimiento del cultivo		
PC 2	Siembre en el período ideal para cada variedad.	1 al 30 de octubre. Utilice siempre semilla certificada y dosis de semilla de 180 a 200 kg ha^{-1} en siembra manual. En el caso de siembra en seco, 100 a 130 kg ha^{-1} de semilla certificada. Por otro lado, 140 a 150 kg ha^{-1} en siembras por avión.
PC 3	Población establecida.	Cuente con una población de 250 a 350 plantas por m^2 en el momento que las plantas de arroz tengan 4 a 5 hojas completamente desplegadas.
Desarrollo y manejo del cultivo		
PC 4	Baja presencia de malezas.	Usted deberá lograr una pérdida menor al 5 % del rendimiento potencial de su potrero por presencia de malezas.
Manejo de plagas y enfermedades Si bien, aún no es un problema general de importancia, hay que estar pendientes de ellas. Es importante que identifique posibles problemas. Entre las que tienen relevancia están: Gorgojo acuático (*Neobagous coarcticollis)*. Mancha carmelita, mancha marrón de la hoja o mancha parda (*Helmintosporiosis: Helminthosporium oryzae = Cochliobolus miyabenus)*.		
PC5	Fertilización Nitrogenada (N)	Realice la fertilización con nitrógeno (N) en dos parcialidades. La primera (50 % a 66 % del total de N) a siembra y la segunda (50 % a 34 %) desde mediados de macolla a inicio de panícula. Aplique dosis de 100 a 120 unidades de N total para siembras tempranas. En siembras tardías, adecúe la dosis al menor rendimiento potencial y evalúe la aplicación de la segunda parcialidad, según desarrollo del cultivo y condiciones climáticas. Recuerde tener un adecuado control de malezas para el uso eficiente del nitrógeno. Realice la fertlización de potasio (K) y fósforo (P) de acuerdo al análisis de suelo, al 100 % incorporado en pre siembra.
Manejo de agua y daño por frío		
PC 6	Fecha de inicio de panícula (IP).	Su cultivo debe alcanzar el estado de inicio de panícula antes de la primera quincena de enero.
PC 7	Población de macollas.	Su cultivo debe alcanzar una población de macollas de entre 600 y 900 m^{-2} a inicio de panícula.
PC 8	Altura de agua en inicio de diferenciación del polen (IDP).	Se debe alcanzar una altura de agua de unos 20 cm al inicio de diferenciación del polen (IDP). Esto ocurre unos 10 a 15 d con posterioridad al inicio de panícula (IP), dependiendo de la fecha de siembra y condiciones climáticas, por lo que este dato es sólo referencial. El estado de IDP es el de mayor sensibilidad a bajas temperaturas ambientales por parte del cultivo.

Madurez del cultivo		
PC 9	Momento de cosecha.	Se estima como momento óptimo de cosecha, aquel en que el grano ha alcanzado una humedad de 18 % a 22 %. Mayor grado de humedad no implica mayor rendimiento industrial, pero sí un mayor descuento por exceso de agua y posterior secado del grano. Al contrario, menor a 18 % de humedad en el grano, puede incurrir en un menor rendimiento industrial, al tener mayor presencia de grano partido por efecto mecánico de la trilla. Exija regulación de la máquina cosechadora de acuerdo a las condiciones de humedad del grano al momento de la cosecha.

Fuente: Fundación Chile.

Herramientas de apoyo para la implementación del Cropcheck

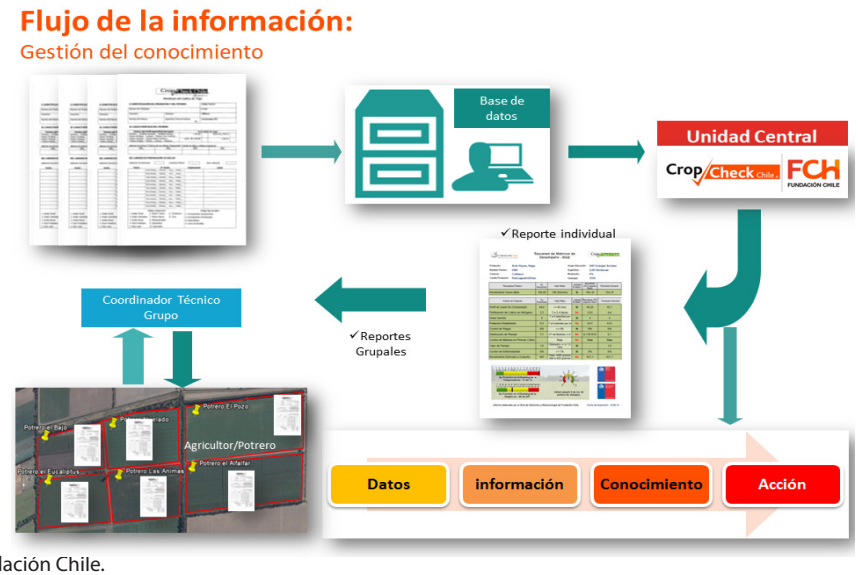


El Cropcheck cuenta con una publicación principal que se denomina ´Manual de Recomendaciones` (1ra edición, 2007, y 2da edición, 2010), donde se resumen las mejores prácticas de manejo para el cultivo en el que se trabaja. El manual entrega a los productores las pautas o recomendaciones esenciales para el manejo del cultivo durante todo el ciclo del crecimiento. En este documento, el agricultor encuentra las respuestas a todas sus preguntas respecto del manejo del cultivo. Además, contiene toda la metodología de medición de los puntos de chequeo y la justificación de los valores metas recomendados para cada uno de ellos.

Como materiales de trabajo, las herramientas de medición del Cropcheck, son elementos sencillos y prácticos que ayudan en las tareas de monitoreo. Entre los elementos comunes para todos los cultivos está el anillo de plástico que representa una superficie de 0,1 m^2 (este anillo se ocupa para los cultivos sembrados al voleo, como el arroz), un barreno para poder observar las condiciones del suelo, una regla de 1 m para los conteos en arroz, si es sembrado en hileras.

Además, Ricecheck cuenta con una ficha de registros, donde se anota el monitoreo de los puntos de chequeo y manejo. Se completa una ficha por cada potrero o unidad de manejo común. La ficha se compone de: 1) Identificación del productor y potrero; 2) características del potrero; 3) labores de preparación de suelos; 4) siembra; 5) fertilización; 6) registro monitoreo y aplicación de herbicidas / insecticidas / fungicidas; 7) seguimiento del cultivo (plantas m^{-2}, macollas m^{-2}, otros); 9) cosecha; 10) costos del sistema agrícola.

Las fichas de monitoreo son la base para lo que se denomina la gestión del conocimiento Cropcheck que se desarrolla de acuerdo al esquema de la Figura 2.



Fuente: Fundación Chile.

Figura 2. Gestión del conocimiento Cropcheck, 2014.

Uno de los elementos centrales de la metodología Cropcheck es el uso de la información generada en el aprendizaje colectivo. Es por esta razón que se debe contar con un sistema de registro centralizado de los datos tomados en cada temporada. Estos sistemas pueden ser bases de datos computacionales, de mayor o menor complejidad de acuerdo a la cantidad y sofisticación de la información que se maneje.

La información que contiene la base de datos es la generada en el seguimiento de las unidades de chequeo (potreros). Por cada potrero se completa una ficha de registro, y todas las fichas de registro o seguimiento de todos y cada uno de los potreros del grupo deben ser ingresados al sistema. Además, por cada potrero o unidad de chequeo, se ingresa una ficha de identificación y también la información diaria de las estaciones meteorológicas asociadas.

Los datos son ingresados ordenadamente, de forma que la información esté disponible para su análisis, emisión de informes individuales o grupales y para las consultas específicas. El sistema debe ser capaz de: categorizar información; ingresar la información centralizada; ordenarla; procesarla; y generar informes comparativos de los cultivos para cada uno de los factores con relación a los objetivos planteados, como el mejoramiento de la producción, calidad, ambiente y eficiencia. De esta forma, se podrá realizar un análisis exhaustivo y concluyente con los datos obtenidos.

Entre los años 2007 y 2009, el equipo técnico de Ricecheck en Chile, en conjunto con la Universidad de California, validaron la carta de color de hoja (´Leaf color chart`) para establecer el nivel de nitrógeno en la planta y sus requerimientos, basados en la hipótesis de que el manejo de nitrógeno en lugares de clima templado como Chile, Australia y California es similar. La diferencia radica en que, en Australia y California, la segunda parcialidad de nitrógeno se aplica en estados de desarrollo posteriores a lo que se hace en Chile, entre finales de macolla e Inicio de panícula.

La experiencia generada por el proyecto ´Conceptos de diseño y acondicionamiento de suelos arroceros y herramientas para el manejo de la fertilización nitrogenada en arroz` y por el trabajo de otros investigadores nacionales e internacionales, indica que la clave de la sub fertilización observada se encuentra en el cómo y cuándo se debe fertilizar con nitrógeno, más que en la cantidad de nitrógeno que se debe aplicar.

Durante el proyecto se trabajó en la adecuación de los suelos arroceros, especialmente en la nivelación láser, considerando levantamiento topográfico y posibilidad de nivelar en forma simultá-

nea en dos planos: altimétrico y longitudinal. También se diseñó y elaboró un prototipo de ´rodillo arrocero` con el cual los agricultores pueden terminar de preparar la cama de semilla antes de su siembra sobre suelo inundado, al igual como se hace en Australia y California. Con ello se mejora la uniformidad en la distribución de la semilla al voleo, tanto manual como área (Foto 1).

Foto 1. Rodillo arrocero elaborado por la Fundación Chile. 2008.

Antecedentes que constituyen la metodología Cropcheck

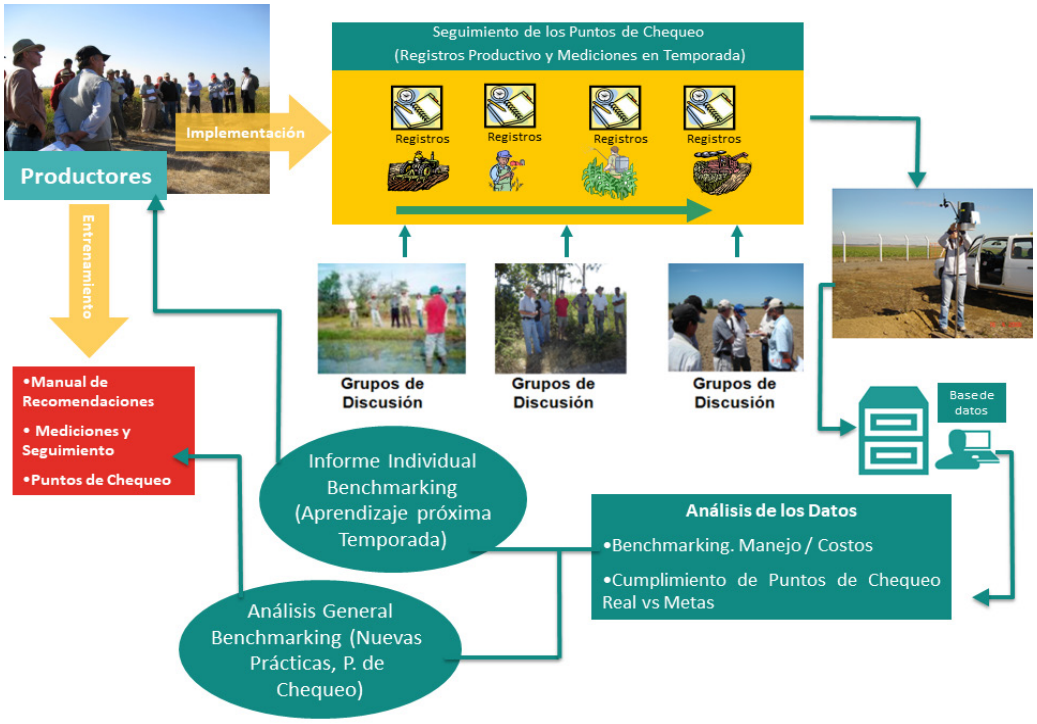
En los puntos anteriores se describió la metodología que, en su esencia, busca crear el hábito en el registro de datos relacionados con el desarrollo y resultado final del cultivo. Al mismo tiempo involucra al asesor y agricultor para que conozca el comportamiento del arroz en un ambiente determinado, y así darles una base para realizar medidas correctivas durante la actual y próximas temporadas para mejorar los sistemas mediante un ´benchmarking` productivo. Esta metodología crea un ambiente colaborativo, en el cual los agricultores, asesores y expertos pueden conocer e intercambiar experiencias a partir de sus aciertos y errores. Todo esto se realiza con la finalidad de mejorar sus sistemas productivos, adecuándose a los nuevos escenarios que demandan una producción sustentable (Figura 3).

A mayor adopción de los puntos de chequeo, los rendimientos tienden a subir. Esta situación no es resultado de un hecho aislado, sino que corresponde a la conjunción de factores agronómicos (manejo del cultivo) y condiciones meteorológicas que terminan por acelerar o desacelerar el crecimiento en rendimientos y calidad. Lo que se busca es minimizar su impacto, implementando las mejores prácticas y adecuándose a las condiciones edafoclimáticas limitantes que se presenten.

De este modo, para la implementación y operación del modelo, se deben considerar los elementos trascendentales que representan la adaptación realizada por Fundación Chile de la información y conocimientos del sistema australiano. Esos elementos son:

1. Puntos de chequeo.
2. Recomendaciones de manejo o mejores prácticas de cultivo.
3. Materiales de trabajo: publicaciones (manual de recomendaciones; manual de monitoreo, fichas de registros; otras guías prácticas de reconocimiento de malezas, plagas, y otras; y manual del coordinador) y herramientas de medición.
4. Información climática.

5. Grupos de discusión.
6. Sistema de entrenamiento y capacitación de productores.
7. Base de datos.



Fuente: Fundación Chile.

Figura 3. Esquema de trabajo Cropcheck, 2010.

De acuerdo a la experiencia en la adaptación del Cropcheck en el país, FCh definió la metodología de trabajo para este sistema en dos niveles sucesivos. Uno tendiente a desarrollar los elementos bases para la aplicación del sistema en un rubro determinado, y otro para la operación anual con grupos de productores de un rubro específico. Inicialmente, la aplicación del Sistema Cropcheck requiere de la instalación de las capacidades y elementos bases, de forma que estén disponibles para la operación anual de un grupo o grupos de productores. Esta tarea se realiza para cada rubro en particular, y puede requerir de 3 o más temporadas. Se necesita formar al coordinador o coordinadores que estarán a cargo de los grupos de discusión y posteriormente desarrollar los elementos que se detallan:

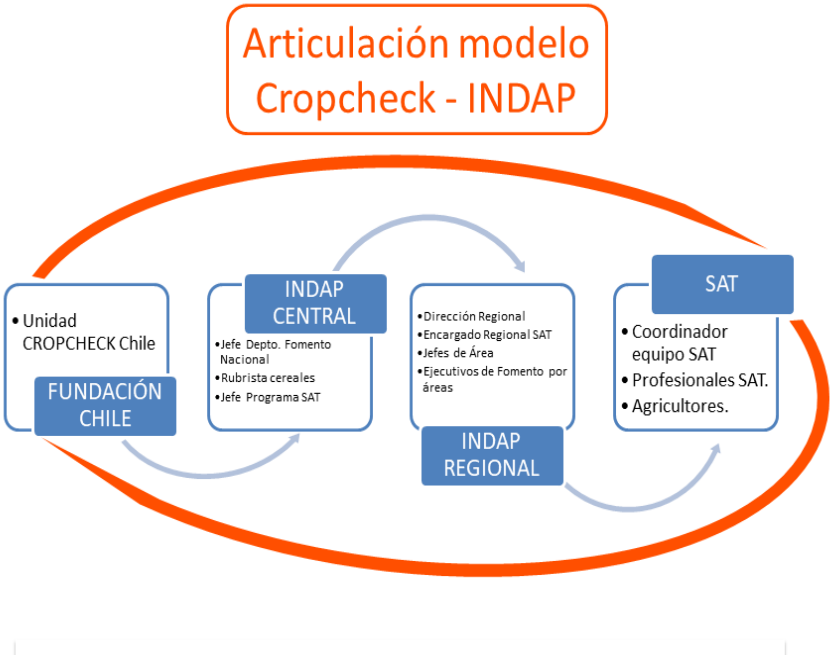
1. Puntos de chequeo asociados a alta producción. Indicadores, rangos de variación para cada uno de ellos, y metodología de medición.
2. Manual de recomendaciones con las mejores prácticas de cultivo.
3. Base de datos y sistema de procesamiento de información.
4. Sistema para el registro de información climática.

Estos elementos base son los que, posteriormente, se utilizan en la operación anual del Cropcheck para uno o varios grupos de productores de un mismo rubro.

La incorporación de nuevas tecnologías o mejoras a partir de una base de datos en tiempo real y disponible en la web, como así también disponer de la visibilidad de la información por medio de un panel de control que facilite la toma de decisiones, constituye un elemento central para una

constante validación del sistema e integración de nuevas tecnologías que permitan mantener actualizado el sistema agrícola productivo.

Para ello, el flujo de comunicación e información para el desarrollo del programa con el INDAP, el cual se espera que identifique y resuelva eventuales problemas en el desarrollo de su implementación, quedó definido preliminarmente (Figura 4).



Fuente: Fundación Chile.

Figura 4. Relación INDAP-Cropcheck.

Beneficios del Cropcheck para los diferentes participantes:

Para el productor:

- ✓ Mejores rendimientos, calidad y, por lo tanto, mayores ganancias y sustentabilidad.
- ✓ Mejores estándares productivos de su zona que le permiten obtener los más altos rendimientos.
- ✓ Evalúa en forma objetiva su cultivo y los resultados obtenidos.
- ✓ Recibe un informe técnico del manejo de su cultivo cada temporada.
- ✓ Cuenta con un plan de mejoramiento productivo de mediano plazo para el mejoramiento del manejo de su cultivo.
- ✓ Accede a las últimas innovaciones técnicas de su área.
- ✓ Accede a información técnica, comercial, industrial y otras relevantes para su quehacer.
- ✓ Recibe asesoría y capacitación técnica.
- ✓ Participa en grupos de trabajo técnico en su área.
- ✓ Incrementa su especialización productiva.

Para asesores e investigadores y proveedores de servicios:

- ✓ Apoya la labor de extensión, ya que dispone de más información y de forma rápida y fácil, para registrar y analizar información de los cultivos de sus clientes.
- ✓ Complementa o permite proveer de nuevos servicios.
- ✓ Aporta en alineamiento con la producción y el mercado.
- ✓ Puede ser usado para análisis de investigación de mercado y segmentación de ventas.

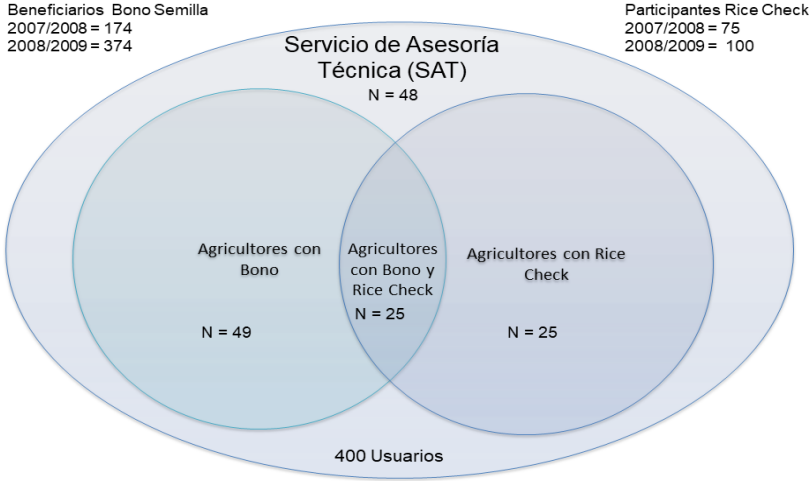
Para las agroindustrias:

- ✓ Mayor seguridad de abastecimiento tanto en calidad como cantidad.
- ✓ Conoce los estándares productivos de sus proveedores.
- ✓ Mejora su grado de vinculación con los proveedores.

Para la comunidad:

- ✓ Mayor crecimiento y productividad. Uso más eficiente de los recursos. Mayor productividad total de factores.
- ✓ Disminuye las brechas productivas entre productores.
- ✓ Desarrolla el capital humano.
- ✓ Resultados cuantitativos de la implementación del Cropcheck en arroz

Una evaluación del modelo y su implementación en el trabajo con INDAP, lo constituye la comparación que se muestra en la Figura 5. En ésta, por medio de los registros de la base de datos del Cropcheck y los obtenidos por el INDAP desde la industria arrocera, se da cuenta de los beneficios de la adopción del modelo, respecto de aquellos grupos de agricultores que aún no se integraban al sistema (Cuadro 3).



Fuente: Elaborado por Alfredo Mariño. INDAP, 2010.

Figura 5. Evaluación del Cropcheck por INDAP Nivel Central, 2010.

Cuadro 3. Comparación en rendimiento (t ha^{-1}) entre agricultores que adoptaron Cropcheck, respecto de agricultores que no se integraron al sistema, en dos temporadas.

	Rendimiento en t ha^{-1}	
Tecnología aplicada	2007/2008	2008/2009
SAT	5,7	6,2
Con semilla certificada	5,9	6,6
Con Ricecheck	6,2	7,0
Con semilla certificada y Ricecheck	6,6	6,6
Promedio nacional (ODEPA)	5,8	5,4

El beneficio de Cropcheck sobre la inversión fue de $ 0,4 por año para proyectos piloto ($ 1,2 en los tres años de proyecto) y de $ 1,7 por año para el proyecto de escalamiento ($ 3,4 en los dos años).

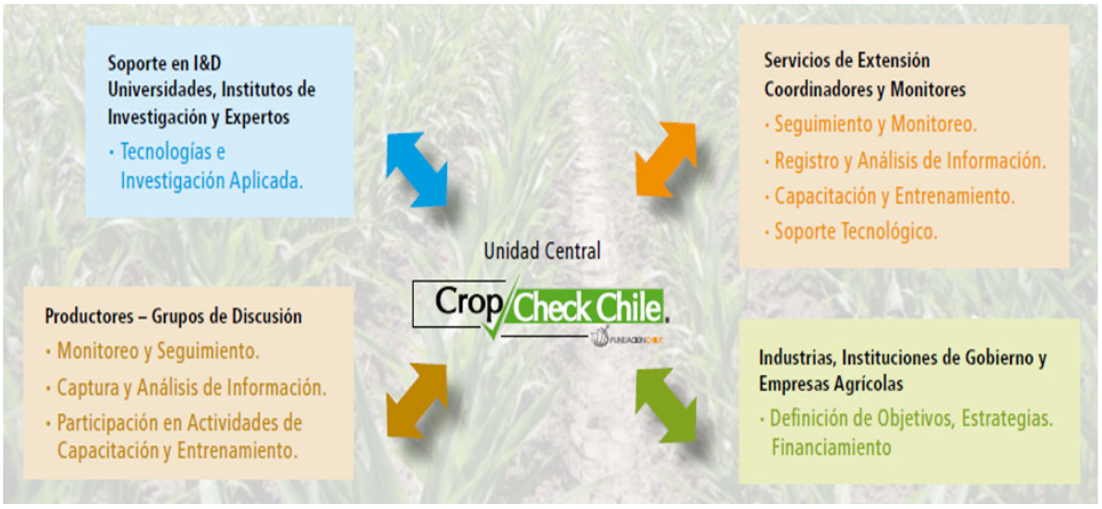
La aplicación de esta metodología en el sector arrocero permitió lograr aumentos de productividad sobre el 22 % y en calidad igual o superior a un 16 % como promedios. En la obtención de estos resultados ha sido clave el compromiso del INDAP nivel central como de todos los profesionales que conforman los distintos equipos de Servicio de Asistencia Técnica (SAT) que en la etapa de escalamiento tuvieron la responsabilidad de implementar el modelo en cada uno de sus agricultores atendidos, apoyados por las áreas respectivas de la institución.

Consideraciones finales

Desde un principio el modelo ha planteado una visión pluralista, otorgando una alta importancia al involucramiento de todos los participantes desde el inicio de los programas, para que sean partícipes del proceso de planificación y desarrollo. Por ello se valora, principalmente, la participación de productores, extensionistas, empresarios agrícolas, investigadores, industriales y entidades de gobierno. De esta forma, se permite alinear al Cropcheck con las demandas al interior de cada industria y estructurar las metas u objetivos del programa. Dado que las respuestas o soluciones serán específicas para cada requerimiento o para situaciones diferentes de demanda, es que se busca contribuir a enfocar la investigación y desarrollo a los requerimientos específicos de cada sistema.

Ha sido una constante buscar la integración del trabajo Cropcheck al programa SAT, para que no sea un ´programa de asistencia técnica` paralelo, sino más bien uno que se integre al trabajo de extensión de la Institución. De esta forma, no se duplican los esfuerzos e iniciativas, ni tampoco los recursos.

En la Figura 6 se presentan los participantes del modelo Cropcheck y sus principales funciones. El esquema representa la adaptación realizada por Fundación Chile del modelo de organización australiano a la situación del país, en base a la cual se ha operado hasta ahora.



Fuente: Fundación Chile.

Figura 6. Esquema de adaptación del modelo Cropcheck.

En este esquema fue relevante el apoyo y coordinación que se tuvo con las instituciones de investigación del país, como el caso de los investigadores del Programa de Arroz del Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA) Quilamapu, con los cuales el intercambio de experiencias permitió la adaptación de los parámetros de rendimientos y los puntos de chequeo a la realidad nacional, para que éstos fueran reales y alcanzables por los agricultores. En este trabajo conjunto fue posible, también, realizar actividades de difusión y transferencia de nuevas tecnologías para el sector.

La validación y el alcance que ha tenido Cropcheck junto a INDAP y su Programa SAT, da cuenta de la proyección que aún tiene el programa en el país. Además de la incorporación de nuevas tecnologías, el trabajo desarrollado y por realizar se enmarca en un entorno sustentable con el medio ambiente. ´El sistema reúne las características que necesita la agricultura moderna o ´agricultura inteligente`, sobre la base de una ´big data`. En este sentido, busca la sostenibilidad en el tiempo con un uso racional de los recursos naturales e insumos que el agro requiere.

Para el escenario actual que enfrenta la agricultura, el manejo de la información que se genera es el factor más relevante a considerar. El manejo de la base de datos Cropcheck y su información jugó un rol clave. Fundación Chile comenzó con una base conformada por 20 agricultores arroceros del Maule y llegó a contar con 900. El salto evolutivo, en cuanto al monitoreo y levantamiento de información en el campo, ocurrió mediante tecnologías que permitieron obtener datos en tiempo real (telemetría o mensajes de texto). La tendencia mundial apunta a ´sembrar de sensores el campo` para obtener información en tiempo real. Nuestra mirada está puesta en las tecnologías a utilizar, más allá de los sensores de clima empleados desde un comienzo por el modelo Cropcheck, y el cómo integrarlas al sistema para optimizar su funcionamiento acorde con los requerimientos actuales.

En este sentido, de acuerdo a la experiencia de la Fundación Chile en el trabajo de adopción del modelo australiano, que estaba montado sobre un modelo de extensión de articulación público y privado, más la asesoría internacional en sistemas productivos arroceros de alta producción y calidad del grano, la nivelación de competencias para extensionistas nacionales fue más fácil cuando éstos presentaban competencias y habilidades blandas para la extensión, pues respondieron de mejor forma a las capacitaciones ante nuevos requerimientos.

Referencias

Fundación Chile. 2010. Crop Check Chile: Sistema de Extensión para el Sector Agroalimentario. 2ª Edición. Fundación Chile, Santiago, Chile. https://fch.cl/multimediapublicaciones/sistema-de-extension-para-el-sector-agroalimentario-cropcheck/

Fundación Chile. 2011. Crop Check Chile: Manual de recomendaciones cultivo de arroz inundado desde siembra. 2ª ed. Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), Fundación Chile, Santiago, Chile. https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/cultivo-arroz-inundado-desde-siembra.pdf?sfvrsn=0.

Agradecimientos

Equipo de trabajo CropCheck arroz de Fundación Chile: Patricia Tobar R., Rodrigo Acevedo V., Ingrid González N., Mauricio Toro T., Mireya Zerené Z., Cristina Cabello H., Flavio Araya M., Luis Urbina R., Alfredo Mariño A. (Coordinador programa cereales, INDAP), Gustavo Cobo L., Asesor cultivos, John Lacy (Ricecheck del Yanco Agricultural Institute. NSW DPI, Australia) y Dr. Randall Mutters (Universidad de California, Davis).

Capítulo 30. Sistema de siembra de arroz con semilla pregerminada sobre suelo inundado

Ramón Henríquez S., Marcelo Ibáñez A., Eduardo Godoy C., Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Nelso Badilla R.

Actualmente, en el país se utilizan dos sistemas de siembra en el cultivo del arroz: a) semilla pregerminada sobre suelo inundado, que abarca alrededor de un 80 % de la superficie sembrada; y b) siembra directa en suelo seco, utilizada por el 20 % de los agricultores.

Preparación de suelo

En los últimos 20 años, la preparación de suelo ha sufrido fuertes cambios favorecidos por la puesta en marcha del Programa de Recuperación de Suelos Degradados (PRSD), financiado por el Ministerio de Agricultura y ejecutado por INDAP, con el que a partir del año 1999 se incorporó la micronivelación de suelo a cota cero con sistema láser, labor que debía realizarse con la superficie seca para facilitar el movimiento de tierra. Conjuntamente, empezó a utilizarse un nuevo equipo para la construcción de pretiles, denominado ´pejerrey` (Foto 1). A la fecha, el 90 % de la superficie destinada al cultivo del arroz se encuentra micronivelada. Cabe destacar que esta labor se debe realizar cada 4 a 5 años en el suelo a cultivar.

Foto 1. ´Pejerrey`, equipo para hacer los pretiles.

La micronivelación trajo, entre otras ventajas, la reducción de pretiles por unidad de superficie, lo que implica mayor superficie y uniformidad del cultivo, mejor manejo del agua, mejor control de malezas, y mayor eficiencia en el uso de maquinaria agrícola, disminuyendo el uso de arado de tracción animal. Bajo estas circunstancias, la preparación de suelos se puede realizar con dos rastrajes (cincel) y una labor de rotofresadora, seguido del llenado del agua de los cuadros. De esta manera se evita el ´fangueo`, labor que causa erosión del suelo y que, en algunos casos, cuando el barro cubre total o parcialmente la semilla, unido a bajas temperaturas, aumenta la pérdida de semilla por ´almidonamiento`.

En general, se recomienda iniciar la preparación del suelo en el verano, para terminarla en la primavera, lo que favorece un buen control de malezas y la siembra en la época recomendada (Hernaíz y Alvarado, 2007). Sin embargo, el tipo de preparación del suelo va a depender del cultivo anterior, por lo cual, es importante tener en consideración el manejo del rastrojo dejado por el cultivo.

Cuando se utiliza una rotación de arroz – pradera natural – arroz, se empieza en primavera-verano del año anterior a la siembra, con 1 a 2 rastrajes con rastra tipo off-set, con el objetivo de exponer las malezas perennes de propagación vegetativa (hualtatas, pasto cabezón, etc.) al sol y el viento, provocando la deshidratación y muerte del material vegetal. También en esta época se reparan los pretiles con tierra seca, usando el ´pejerrey`.

En invierno se reparan los pretiles con una pasada de ´pejerrey` en suelo barroso o en forma manual (pala). Es necesario indicar que el uso de ´pejerrey` en invierno deja huellas de consideración causadas por las ruedas del tractor. En primavera se puede realizar un barbecho químico y, cuando las condiciones de suelo son friables, se puede rastrear dos veces, terminando con una pasada de rotofresadora. Antes del último rastraje se puede aplicar el fertilizante en cobertera, utilizando un trompo abonador (Riquelme et al., 2015). Es recomendable realizar la incorporación de la mezcla de fertilizante con rastra a no menos de 12 cm de profundidad y, posteriormente, se puede pasar la rotofresadora. Si la incorporación de la mezcla de fertilizantes se realiza con rotofresadora, se pueden presentar problemas mayores con la aparición posterior de la lama, ya que la rotofresadora remueve el suelo alrededor de 5 cm de profundidad, dejando una mayor disponibilidad de nutrientes para esta alga acuática que se propaga con mucha rapidez y que se ubica sobre la superficie del agua, impidiendo que el arroz pueda emerger.

Una vez terminada la preparación del suelo, se debe realizar rápidamente el llenado de los cuadros, para favorecer el control de malezas y evitar la competencia con las plantas de arroz al momento de la siembra. Los cuadros, deben quedar con una altura de agua promedio de 5 a 10 cm. Los sectores de suelo descubiertos pueden ser eliminados con un ´rastrón` de madera con clavos (´carrancha`) tirado por un caballo, o bien, realizar un nuevo pretil o ´cortada` para uniformar la nivelación del suelo y realizar la siembra con semilla pregerminada.

La preparación de suelo en potreros con monocultivo de arroz es una condición menos favorable, debido a que este sistema promueve una mayor infestación de malezas, pérdida de nutrientes y otros problemas, como el manejo después de la cosecha de un gran volumen de paja y una gran cantidad de huellas en el suelo provocadas por la maquinaria de cosecha. En la medida que el terreno se encuentre más húmedo, mayor será el daño por las huellas que dejará la maquinaria. Debido a esta situación, las labores de la preparación del suelo deben considerar una adecuada selección de la maquinaria utilizada en la trilla del arroz. En este sentido, es necesario utilizar una cosechadora combinada automotriz que pique y distribuya la paja adecuadamente, de lo contrario quedará una línea de paja concentrada que dificultará la incorporación y descomposición de estos residuos. El uso de máquina cosechadora con picador y distribuidor de paja, favorecerá la incorporación y descomposición de la paja durante, a lo menos, 2 a 3 meses antes de la nueva siembra. Con ello se evitará el hambre de nitrógeno que se produce en el suelo, durante el proceso de descomposición de los residuos por parte de los microorganismos encargados de este proceso. Una vez picada y esparcida la caña, se realizan inmediatamente dos pasadas de rastra o una de cincel seguida de una rastra, para dejar la caña incorporada y realizar los trabajos en primavera.

Otra alternativa de preparación de suelos es la incorporación del rastrojo de la cosecha en los cuadros con rotovator, el que requiere la presencia de una lámina agua (inundar o lluvia) en el suelo. Con ello se borran las huellas dejadas por los equipos de cosecha. En esta oportunidad se deben arreglar los pretiles con el paso del ´pejerrey`, previo al paso del rotovator. Este sistema de preparación de suelo continúa en primavera con dos pasadas de rastra y termina con la rotofresadora.

Foto 2. Rotovator equipo para la incorporación del rastrojo en la preparación de suelo.

Es importante considerar que el sistema de incorporación del rastrojo en el suelo permite reponer gran parte del potasio, calcio, azufre y microelementos, a diferencia de la quema del rastrojo que produce una pérdida de nitrógeno y azufre contenido en los residuos, a través del proceso de volatilización hacia la atmósfera (Hirzel, 2007), pero en algunos casos puede producir atrasos en la siembra, por la mayor dificultad del secado del suelo, cuando se presentan primaveras lluviosas.

Época de siembra

La temperatura es uno de los factores que determina la fecha de siembra del arroz. Debido a su origen tropical o subtropical, la planta de arroz es susceptible a las bajas temperaturas, por lo cual afecta su crecimiento y desarrollo que se manifiesta, principalmente, en: a) velocidad en el proceso de germinación y emergencia, por ejemplo, en siembras realizadas en la segunda semana de septiembre. La emergencia de las plántulas toma un mayor tiempo que las realizadas durante la primera quincena de octubre en adelante; b) crecimiento y desarrollo de las plantas, posterior a la emergencia. En este sentido, los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas toman un mayor tiempo en condiciones de baja temperatura que en un periodo de temperaturas más cálidas; y c) producción de grano. Las bajas temperaturas pueden afectar a diferentes estructuras (óvulo y polen) y a diferentes procesos, como la polinización y fertilización que pueden causar aborto y reducir la producción y la calidad del grano producido (Alvarado y Hernaíz, 2007; Donoso y Paredes, 2015).

Los efectos del frío se pueden manejar a través de la siembra en una fecha óptima que permita a la planta llegar a las etapas de floración y madurez con temperaturas y radiación solar, entre diciembre y enero. Por tal razón, la fecha recomendada para la siembra del arroz es hasta el 19 de octubre. Siembras realizadas después de esta fecha, favorecen el retraso de la floración hasta febrero, cuando la temperatura y radiación empiezan a reducir, y aumenta la probabilidad que las bajas temperaturas puedan afectar el rendimiento y calidad del arroz cosechado (Alvarado y Hernaíz, 2007; Donoso y Paredes, 2015). Siembras realizadas con posterioridad al 10 de noviembre corren el riesgo de perder, aproximadamente, 100 kg ha^{-1} por día de retraso y hasta un 64 % de grano entero por hectárea, debido a un mayor porcentaje de grano verde, manchado y panza blanca (Donoso y Paredes, 2015). Para sembrar en la época recomendada es necesario realizar las labores de preparación del suelo y el llenado temprano de los cuadros.

La siembra manual, a caballo, aérea o con trompo, se debe realizar sobre agua clara y con semilla pre germinada (coleóptilo de 1 a 3 mm). La pre germinación de la semilla se realiza en sacos ¾ llenos, los cuales se sumergen en agua por 2 a 3 d, dependiendo de las temperaturas, y se verifica que to-

das las semillas estén germinadas. La semilla a utilizar debe ser de buena calidad, preferentemente certificada o hija de certificada con análisis de germinación, para asegurar una buena emergencia y establecimiento del cultivo.

Dosis de semilla

La dosis de semilla a utilizar va a depender de una serie de factores como la preparación de suelos, época de siembra, y calidad de semilla utilizada. Sin embargo, la dosis de semilla certificada (o corriente) recomendada fluctúa entre 140 a 180 kg ha^{-1} en siembra manual y 120 a 140 kg ha^{-1} en siembra por máquina sembradora o por avión, donde es importante obtener una cantidad de entre 200 y 250 plantas m^{-2}, distribuidas uniformemente (Alvarado y Hernaíz, 2007; Henríquez et al., 2018).

Variedad

Más del 90 % del arroz producido en el país corresponde a arroz *japonica* templado grano largo-ancho, entre los cuales se destacan las variedades ´Zafiro-INIA` (Cordero et al., 2010) y ´Cuarzo-INIA` (Cordero et al., 2011). En la temporada 2020-2021 ingresó al mercado nacional ´Digua Cl` (Paredes et al., 2019), primera variedad Clearfield producida en el país, que posee un tipo de grano similar a ´Zafiro-INIA` Además de estas variedades, está presente también la variedad ´Platino-INIA`, de grano medio, enfocada a satisfacer el nicho de mercado compuesto por la preparación de algunos platos especiales como sushi y risottos (Paredes et al., 2016). Otra variedad disponible es ´Ámbar-INIA`, variedad de grano glutinoso, destinada también a satisfacer las necesidades de consumo de otro nicho de mercado (Alvarado y Hernaíz, 2005).

Un aspecto importante a considerar en relación a la semilla, es que el uso de semilla certificada ha ido aumentando en el tiempo. De esta manera, el agricultor garantiza la identidad (variedad comprada es la correcta), pureza genética (ausencia de mezclas con otras variedades) y física (libre de impurezas, como malezas prohibidas y otras), y un alto porcentaje de germinación. Todas estas características van a contribuir a obtener un buen rendimiento y calidad del producto cosechado (Alvarado y Hernaíz, 2007).

En los últimos años los pequeños agricultores han optado por mejorar la semilla corriente que sembraban, adquiriendo semilla certificada, cuya cosecha es sembrada en la temporada siguiente. Las empresas consultoras de INDAP han apoyado a los pequeños agricultores en esta actividad, lo cual pretende reducir en forma importante la infestación de sus semillas y campos con arroz rojo, y lograr mejores rendimientos en los cultivos. Por su parte, las empresas también incentivan el uso de semilla certificada.

Control de malezas

La presencia de malezas es uno de los principales factores limitantes de la producción de arroz en el país, ya que reduce el rendimiento en grano paddy y la calidad del producto cosechado. Las malezas causan daño al cultivo a través de la competencia por luz, agua y nutrientes, limitan la eficiencia del uso de agua y de los nutrientes, y aumentan los costos de producción del cultivo. En algunos casos, la presencia de algunas malezas como el hualcacho (*Echinochloa* spp.) y el arroz rojo, puede reducir la calidad y aumentar los costos de selección y comercialización del producto elaborado. En el caso de producción de semillas, la presencia de ciertos niveles de arroz rojo puede implicar el rechazo de los semilleros (Alvarado et al., 2007). Los porcentajes de pérdidas en el rendimiento del arroz paddy varían dependiendo del nivel de infestación de las malezas, pero pueden llegar a valores superiores a un 30 % (Alvarado y Hernaíz, 1995; Pedreros y Kramm, 2007).

Las malezas que crecen en el sistema de producción de arroz inundado son típicas, entre las cuales se pueden distinguir los hualcachos (*Echinochloa crus- galli*; *E. oryzoide; E. cruz-pavonis*), pasto cabe-

zón (*Scirpus mucronatus*), cortadera (*Cyperus difformis*), hualtata (*Allisma plantago-aquatica*), lengua de vaca (*Sagitaria montevidensis* spp. *chilensis*) y el arroz rojo (*Oryza sativa* spp.) (Alvarado y Pedreros, 1991; Ormeño, 1992; Ormeño y Grau, 1988; Pedreros y Kramm, 2007; Alvarado et al., 2007).

Los principales métodos de control se pueden separar en culturales y químicos. Los métodos culturales incluyen una serie de actividades para prevenir o a reducir el nivel de infestación de las malezas en el campo, entre los que se pueden mencionar: preparación adecuada del suelo, uso de semilla certificada, limpieza de los canales, mantención de pretiles y desagües libres de malezas, limpieza de maquinarias y equipos, manejo adecuado de la lámina de agua, entre otras (Alvarado y Hernaíz, 1995; Alvarado y Pedreros, 1991). Los métodos químicos, en tanto, incluyen el uso de diferentes tipos de herbicidas y en diferentes épocas, destinados a controlar las malezas existentes en el campo. Las épocas de aplicación incluyen el uso de herbicidas como barbecho químico, pre-siembra incorporado, pre-emergencia y post-emergencia. Los principales productos utilizados se presentan el Cuadro 1.

Cuadro 1. Herbicidas recomendados para el control de malezas en siembras de arroz inundado.

Espectro/ mecanismo de acción	Ingrediente activo	Marca	Clasificación	Grupo	Acción
Control de malezas gramíneas					
Inhibidor de ACCase	cyhalofop	Clincher	1	Aryloxyphenoxypropionates	Sistémico
	penoxulam	Ricer	2	Triazolopirimidinas	Sistémico
	imazamox + imazapyr	Eurolightning	2	Imidazolinonas	Sistémico
	bispiribac Na	Nominee	2	Pyrimidilbenzoatos	Sistémico
	pyribenzoxin	Pyanchor	2	Pyrimidilbenzoatos	Sistémico
Síntesis de auxinas (AIA)	florpyrauxyfen benzyl	Loyant	4	Pyridincarboxylatos	Sistémico
Inhibidores de síntesis de lípidos	molinate	Brioso Molirox	8	Thiocarbamatos	Contacto
Inhibidores síntesis membrana celular	quinclorac	Facet, Exocet	4	Quinoline carboxylic acids	Sistémico
Control de malezas latifoliadas					
Síntesis de auxinas (AIA)	triclopyr	Garlon	4	Pyridyloxy carboxylatos acids	Sistémico
	MCPA	MCPA/U46	4	Phenoxy carboxylic acid	Sistémico
Inhibidor sistema fotosíntesis II	bentazon	Bentax, Basagran	6	Benzothiadiazinone	Contacto
Protox (PPO)	saflufenacil	Heat	14	N phenil imidas	Contacto

Fuente: Alejandro Toro, comunicación personal.

Los equipos de aplicación varían desde las bombas de espalda, equipos pulverizadores terrestres, aviones y últimamente drones. La aplicación de algunos herbicidas necesita una reducción en el nivel de agua de los cuadros y otros no requieren de esta situación, pudiendo ser aplicados sobre el agua. Debe tenerse en consideración el estado de desarrollo del cultivo o de la maleza, de acuerdo al tipo de herbicida aplicado y el cubrimiento de la planta por el agua, factores determinantes en un buen control de malezas.

Debido a los diferentes tipos de malezas a controlar, es necesario utilizar diferentes estrategias de control integrado que incluya prácticas de prevención, prácticas culturales, manejo agronómico adecuado del cultivo y un efectivo control químico. El control químico debe considerar, en lo posible, la aplicación de un programa que incluya aplicaciones secuenciales, mezclas de herbicidas, uso de herbicidas de diferentes mecanismos de acción, y una rotación de ellos para evitar la aparición de malezas resistentes y la pérdida de efectividad de los herbicidas disponibles (Alvarado y Hernaíz, 1995; Pedreros y Kramm, 2007).

En general, se recomienda realizar las siguientes labores de control:

1. Barbecho químico, utilizando como producto principal glifosato y otras mezclas. Éste se debe realizar 10 a 60 d antes de la preparación de suelo de primavera, enfocado a malezas con reproducciones vegetativas y gramíneas. Si no son controladas en esta etapa, es muy difícil su control durante el desarrollo del cultivo.
2. Herbicidas de post-emergencia. Hay productos que se pueden aplicar sin bajar el nivel de agua del cuadro como el molinate y penoxulan. Con el molinate (control de hualcacho) el nivel de agua debe cubrir 2/3 de la altura del hualcacho y mantener la lámina de agua hasta que la maleza muera. Con el penoxulan (control de hualcacho y hualtata) el nivel del agua debe mantenerse en los 10 cm de altura por unos 5 d, como mínimo. Otros productos, como el quinclorac (control de hualcacho), se aplican cuando el arroz tiene de 2 a 3 hojas, debiendo bajar el nivel de agua hasta 2/3 partes de la maleza expuesta, para luego rellenar a las 48 h. Rinskor (controla hualcacho y hualtata) requiere aplicarse desde 1-2 hojas del arroz y bajar el nivel de agua para la aplicación y reponer al primer o segundo día. En general, los productos antes mencionados se aplican entre los 4 y 25 d post-siembra. Posteriormente, existen productos como MCPA (controla hualtatas y ciperáceas) y bentazon (controla hualtata) que se usan entre los 40 y 60 d, bajando el nivel de agua y reponiéndolo entre 1 a 2 d post-aplicación.

Un problema más o menos frecuente en suelos con monocultivo es la presencia de la ´lama` en la superficie de agua, pudiendo controlarse con algunos productos químicos como el sulfato de cobre, en dosis de 3 a 5 kg ha^{-1}; sin embargo, este control ha sido poco efectivo. En la práctica, se utiliza para el control el secado de los cuadros, es decir, desaguar los cuadros y dejar el suelo expuesto al sol para que se seque el primer centímetro de la superficie del suelo. Una vez que la lama se haya secado, se vuelven a llenar los cuadros a sus niveles normales.

Manejo del agua

En el cultivo del arroz el agua cumple una serie de funciones como, por ejemplo, regulador térmico, ya que evita los cambios bruscos de temperatura; y controlador de malezas, puesto que la inundación inhibe o retarda el crecimiento de las malezas al disminuir su absorción de nutrientes. Para vivir en un suelo inundado, la planta de arroz ha desarrollado estructuras especializadas, como el aerénquima, que le permiten realizar el intercambio de oxígeno en condiciones anaeróbicas (Yoshida, 1981; Drew et al., 2000; Steffens et al., 2010).

Bajo condiciones de inundación, el arroz necesita un gran volumen de agua para realizar su crecimiento y desarrollo. Estimaciones realizadas en el país, sitúan el uso del agua entre 18.000 y

20.000 m^3 ha^{-1}, equivalentes a 18 a 20 mm d^{-1} ha^{-1}, comparado con valores de evaporación que oscilan entre 6 y 11 mm d^{-1} ha^{-1}, dependiendo de la época y las condiciones climáticas (Alvarado y Hernaíz, 1995) y hasta 14.000 m^3 (Henríquez et al., 2018).

En relación de la altura del agua, se plantea mantener una lámina de agua variable de acuerdo al estado de desarrollo de la planta. Es así como se recomienda mantener 5 cm a la siembra, 10 cm entre la siembra y floración, y 20 cm desde la floración hasta el corte del agua para preparar las labores de la cosecha. En este aspecto se recomienda realizar el corte de la entrada de agua cuando el grano está al estado lechoso, manteniendo el agua estancada hasta que se consuma completamente. Sin embargo, al tomar esta decisión, es necesario considerar el tipo de suelo, el estado de los pretiles, las condiciones de drenaje y las condiciones climáticas (Alvarado y Hernaíz, 1995; Hernaíz y Alvarado, 2007).

Hay que considerar que el manejo de agua en suelo micronivelado permite una emergencia uniforme de las plántulas, debido a la homogeneidad de la altura de la lámina de agua, en comparación a un suelo desnivelado, donde se pueden encontrar sectores de suelo sólo saturados, sin lámina de agua, mientras en otros sectores se pueden observar alturas de agua de hasta 20 cm. Esta situación produce importantes pérdidas de semillas y plántulas débiles.

En el manejo general del agua se debe considerar, también, la realización de algunas labores agronómicas, como el control de las malezas y la aplicación de la segunda dosis de nitrógeno, al estado de inicio de macolla y la tercera dosis de nitrógeno a inicios del desarrollo del primordio. En este sentido, se recomienda bajar el agua para realizar la segunda aplicación de nitrógeno y del herbicida, e inundar 24 a 48 h después de la aplicación o de acuerdo a lo que indique la etiqueta del producto químico utilizado, para mejorar la eficiencia del herbicida y del nitrógeno y disminuir la emergencia de nuevas generaciones de malezas (Alvarado y Hernaíz, 1995).

Fertilización

Los suelos llamados ´arroceros` poseen, en general, un bajo nivel de nutrientes debido, entre otras razones, al uso intenso del suelo asociado al monocultivo del arroz. Generalmente, estos suelos poseen un pH entre 5,5 y 6,4 (leve a moderadamente ácido), contenidos de materia orgánica entre 1,6 % y 3,5 %, un nivel de fósforo disponible inferior a 10 ppm y niveles de potasio inferiores a 100 ppm. Asimismo, contienen un nivel variable de nitrógeno incubado y adecuados niveles de disponibilidad de calcio, magnesio, azufre, boro, cobre, zinc y sílice (Hirzel, 2007). Por esta razón, la fertilización tradicional del arroz incluye las aplicaciones de nitrógeno, fósforo y potasio. Hoy en día, los niveles de micronutrientes se han reducido y el pH de los suelos ha bajado, por lo que los análisis de suelo se hacen cada vez más importantes para corregir deficiencias.

Las dosis y el tipo de fertilizantes a utilizar deben ser los recomendados por el análisis químico de suelo y el nivel de rendimientos potencial esperado. En una fertilización estándar (NPK), se debe considerar la aplicación de un 20 % de la aplicación del nitrógeno y un 100 % de la aplicación de fósforo y potasio, previo a la siembra (Hirzel, 2007). Esta aplicación se puede realizar con un trompo abonador. Por lo general, la segunda aplicación se realiza al estado de macolla, cuando el arroz tiene 3 a 4 hojas, en cobertera y después del control de malezas. La tercera dosis de aplicación de nitrógeno se puede hacer por avión o en forma manual (Foto 3), después de la inundación. Estas dos aplicaciones de nitrógeno deben incluir el 80 % de la recomendación realizada (Hirzel, 2015).

Foto 3. Fertilización nitrogenada a caballo en siembra de semilla pre germinada.

En relación a la forma de nitrógeno absorbido por la planta de arroz en condiciones de inundación, ésta prefiere formas amoniacales, es decir, hasta el inicio de la panícula y posteriormente en formas nítricas. En este sentido, las formas amoniacales favorecen a los componentes de rendimiento que se desarrollan temprano en el proceso de crecimiento de la planta, como el número de macollas y de panículas por planta. En cambio, la forma nítrica estimula aquel componente de rendimiento que se expresa más tarde, como el peso de los granos. Por otro lado, la condición aeróbica que se presenta en los primeros 5 a 10 cm de profundidad del suelo, permite la transformación del amonio a nitrato, proceso acelerado por las temperaturas (Hirzel, 2007).

En general, las dosis de nutrientes utilizadas fluctúan entre 90 y 120 kg ha^{-1} de nitrógeno, aplicados un 20 % a la siembra, 60 % a inicio de macolla (arroz con 3 a 5 hojas) y un 20 % a inicio de primordio (45 a 60 d después de siembra), además de unos 60 kg ha^{-1} de fósforo y 60 a 80 kg ha^{-1} de potasio. El fósforo y el potasio se aplican previo a la siembra y se incorporan en la última labor de la preparación del suelo. Realizada la fertilización de pre siembra, el llenado de los cuadros con agua debe ser lo más rápido posible, para evitar pérdidas de nitrógeno por volatilización. La labor del llenado rápido de los cuadros se debe realizar igualmente posterior a la segunda y tercera aplicación del nitrógeno, ya que se realizan con el suelo seco.

Una modificación de esta recomendación general se realiza en el sector sur poniente de Parral, donde existe el suelo rojo arcilloso, perteneciente a la serie Parral. En este sector se realiza, principalmente, la rotación arroz-pradera natural. En siembras realizadas entre el 5 y 20 de octubre, se recomiendan hasta 120 kg ha^{-1} de N, parcializadas en tres aplicaciones. En pre-siembra, se aplica un 40 % de la dosis de N, la cual va incorporada con el 100 % del fósforo y el 65 % del potasio. En la segunda aplicación nitrogenada se usa el 40 % y el 25 % de potasio, a los 30-35 d posterior a la siembra. Finalmente, en la tercera aplicación de nitrógeno, se añade el 20 % restante, a los 65 a 70 d después de la siembra.

En estos sectores no es recomendable aplicar dosis más altas de nitrógeno, ya que, por condiciones de suelo, temperatura ambiental y temperatura de agua, el desarrollo del cultivo es más lento y se corre el riesgo de exceso de desarrollo vegetativo en desmedro de la producción de grano, conocido comúnmente como ´vanazón` o ´empajamiento`. En la medida que la fecha de siembra se atrasa, hay que reducir la dosis de nitrógeno en la primera y segunda aplicación (10 % a 15 %) y se puede llegar a suspender la tercera dosis.

La primera aplicación de fertilizantes de pre siembra (NPK) se incorpora con la última labor de suelo, rastraje o rotofresadora. Se procede al llenado de los cuadros en forma rápida, para evitar pérdidas de nitrógeno. La segunda dosis de nitrógeno se realiza con agua estancada (´trancada`) por 1 d, para luego regular el flujo y la lámina de agua según desarrollo del cultivo, al igual que en tercera aplicación.

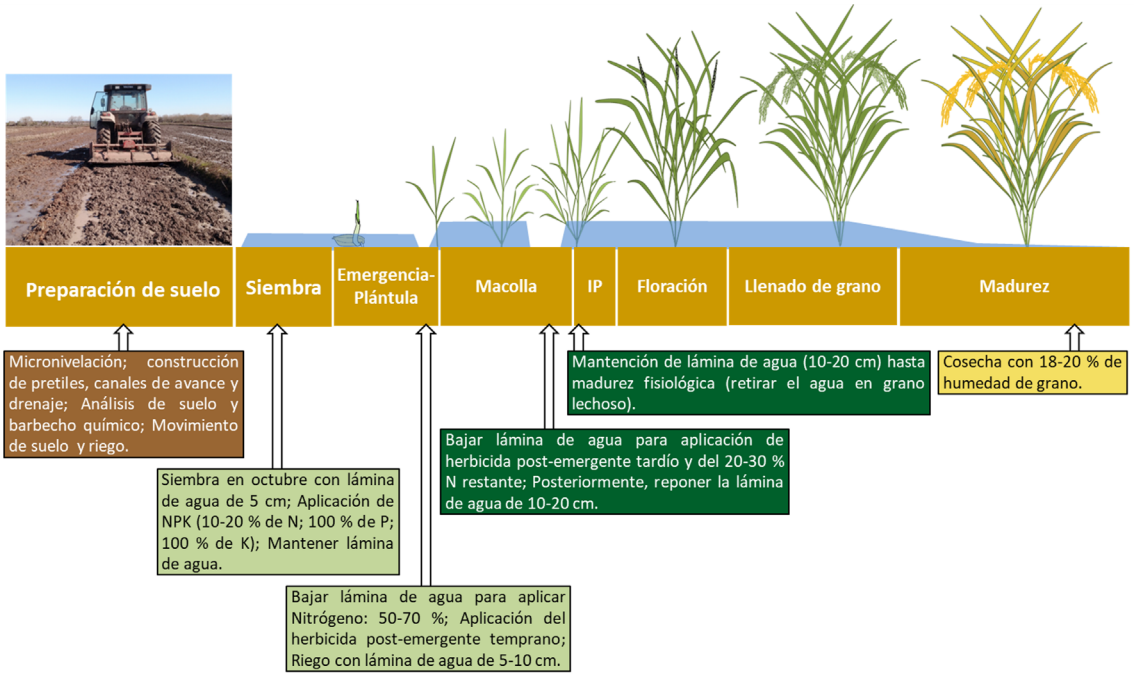
Las mezclas de fertilizantes usadas son la 15-22-22 de pre-siembra, en dosis de 300 kg ha^{-1} para la segunda aplicación la mezcla 30-0-20 en dosis de 150 kg ha^{-1} y para la tercera aplicación se usa urea en dosis de hasta 50 kg ha^{-1}.

Cosecha

Al momento de la cosecha es importante tener en cuenta la humedad del grano, la que puede variar entre un 18 % y un 24 % de humedad. Es importante revisar y regular la automotriz al comienzo de la cosecha, para evitar pérdidas de grano o producir grano partido (Alvarado y Hernaíz, 2007; Riquelme, 2007; 2015) y porcentaje de granos verdes. La cosecha sobre suelo seco tiene como ventajas evitar la formación de huellas en el suelo, reducir las labores del suelo y el uso de combustible de la automotriz y del tractor.

Resumen Siembra Pregerminada

Principales actividades a realizar en la siembra convencional, suelo inundado con semilla pregerminada (Figura 1).



Fuente: Elaboración: Donoso, G., 2021.

Figura 1. Sistema de producción de arroz siembra pregerminada.

Referencias

Alvarado, R., Hernaíz, S. 1995. Manual de producción de arroz. Programa de Reconversión de Suelos Arroceros, Ministerio de Agricultura. Serie Quilamapu N°62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2005. Ámbar-INIA, nuevo cultivar de arroz con grano corto y muy bajo contenido de amilosa. Agric. Téc. (Chile) 65:101-104.

Alvarado, R., Hernaíz, S. 2007. Variedades, siembra, semilla certificada, dosis de semillas y épocas de siembra. p. 21-37. En Alvarado, R. (ed.) Arroz. Manejo tecnológico. Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Hernaíz, S., Kramm, V. 2007. Arroz rojo, un problema actual. p. 127-136. En Alvarado, R. (ed.). Arroz. Manejo tecnológico. Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Alvarado, R., Pedreros, A. 1991. Presencia de arroz rojo en Chile. Agric. Téc. (Chile) 51:374-377.

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.

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.

Donoso, G., Paredes, M. 2015. Efecto de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz. p. 18-21. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Drew, M., He, C-J., Morgan, O. 2000. Programmed cell death and aerenchyma formation roots. Trends Plant Sci. 5:123-127.

Henríquez, R., Henríquez, E. Sepúlveda, D., et al. 2018. Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas en arroz en Chile. Serie estudios para la innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.

Hernaíz, S., Alvarado, R. 2007. Manejo del agua en el arrozal. p. 49-57. En Alvarado, R. (ed.) Arroz. Manejo tecnológico. Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hirzel, J. 2007. Nutrición y fertilización del cultivo del arroz. p. 87-103. En Alvarado, R. (ed.) Arroz. Manejo tecnológico. Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Hirzel, 2015. Nuevos antecedentes en la fertilización nitrogenada. p. 43-50. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Ormeño, J. 1992. Efecto del hualcacho (*Echinochloa* spp.) sobre el rendimiento de arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile. Agric. Téc. (Chile) 52:208-213.

Ormeño, J., Grau, P. 1988. Las principales malezas de importancia económica en el cultivo del arroz en Chile. Bol. Agric. Shell 48:6-11.

Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2016. Platino-INIA. Nueva variedad de arroz grano medio. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

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), Chillán, Chile.

Pedreros, A., Kramm, V. 2007. Malezas en arroz. p. 107-126. En Alvarado, R. (ed.) Arroz. Manejo tecnológico. Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Riquelme, J. 2007. Cosecha mecanizada del arroz. p. 137-154. En Alvarado, R. (ed.) Arroz. Manejo tecnológico. Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Riquelme, J. 2015. Cosecha mecanizada. p. 67-71. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín N° 306. Instituto de Investigaciones

Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Riquelme, J., Parada, J., Paredes, M., et al. 2015. Establecimiento del cultivo del arroz. p. 26-31. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Steffens, B., Gesk, T., Sauter, M. 2010. Aerenchyma formation in the rice stem and its promotion by H_2O_2. New Phytol. 190:369-378.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, The Philippines.

Capítulo 31. Siembra directa en el cultivo de arroz en Chile[1*]

Ramón Henríquez S., Gonzalo Henríquez S., Manuel Maureira C., Víctor Salas C., Joel Aravena C., Jaime Mellado S., Christian Véliz P., María Falcón E., Verónica Retamal P.

Siembra directa en el cultivo del arroz

Preparación de suelo

La preparación de suelo es fundamental para un buen establecimiento del arroz. Las lluvias primaverales impiden realizar el laboreo en fecha óptima para una posterior siembra. La humedad del suelo marca el piso de entrada al predio para que la maquinaria comience sus labores. La condición ideal del suelo para ser laboreado es en estado friable, caracterizado por la facilidad para desmenuzarse.

Se subdividen una serie de labores que, para el caso del sistema de siembra directa o en seco, están determinadas por la nivelación del terreno, la que se puede realizar con niveladora multilámina y mediante micronivelación con pala láser. Con posterioridad debe realizarse el diseño predial, el trazado de curvas de nivel y la construcción de taipas, para finalizar con la construcción de drenajes.

Nivelación del terreno

La preparación de suelos arroceros y micronivelación con pala láser es imprescindible para la siembra de arroz (Foto 1). Consiste en dejar los cuadros o cancha a cota cero, a una diferencia de altura de 5 a 10 cm. La marca o curva de nivel es donde se construye la taipa o pretil. En el sistema de siembra directa con taipa se construye, además, una taipa dentro de la cancha. Esta práctica se puede realizar principalmente en verano, otoño o primavera, resultando muy necesario volver a nivelar el suelo cada 4 años.

También existe la posibilidad de que, una vez nivelado el suelo con pala láser, en los sucesivos años se realice una micronivelación con multilámina, la cual remueve el suelo a una diferencia de altura de 1 a 2 cm. La primera pasada va en sentido de la pendiente y la segunda perpendicular a la primera.

Foto 1. Nivelación del terreno con pala láser.

1* El texto de este capítulo corresponde a un extracto del ´Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas de arroz en Chile`. Serie Estudios para la Innovación FIA. 2018. Elaborado por AGROPARRAL. Resumen autorizado para su publicación.

Construcción de canales de avances

El sistema de siembra directa, ´sobre taipa`, se realiza con la ´taipadera`, que consiste en dos pasadas paralelas distanciadas entre 2,0 y 2,5 m desde la cresta de la taipa. Éstas se deben disponer en sentido de la pendiente, para facilitar el movimiento del agua. El primer canal de avance se ubica en la entrada de agua al potrero en forma transversal, mientras que los restantes se disponen, en forma paralela, a una distancia de 150 m, además de canales laterales por el contorno del potrero. De acuerdo a la superficie del potrero, existen dos modalidades de construcción de canales de avances. La primera consiste en realizar dos canales laterales: el canal de entrada de agua y el canal de salida. Cabe señalar que generalmente se utiliza para superficies pequeñas (2 a 4 ha). La segunda modalidad consiste en realizar los dos canales laterales ya nombrados, más un canal que vaya de forma diagonal en el potrero. Esta modalidad se utiliza, preferentemente, para superficies mayores a 4 ha. En el sistema de siembra directa, dentro del cuadro, los canales de avances se pueden realizar con el equipo denominado ´pejerrey` (Foto 2), a una distancia de 1 m aproximadamente. Primero se deben construir los canales laterales y, cuando la superficie es mayor a 4 ha, los canales paralelos a una distancia de 150 m.

Foto 2. Canal de avance realizado con el equipo ´pejerrey`.

Trazado de curvas de nivel

El trazado de las curvas de nivel es una labor que se debe realizar con:

a) **topógrafo:** el trazado de las curvas de nivel con topógrafo se realiza con un nivel topográfico y una regla graduada. Principalmente se utiliza para las nivelaciones realizadas con el equipo multilámina o pala niveladora, que deben ser construidas a una diferencia de cota de 2 a 4 cm (taipa) y de 6 a 8 cm (pretiles), o realizadas con tracción animal o tractor.

b) **equipo láser:** el trazado de las curvas de nivel con sistema láser se utiliza para mejorar la precisión y rapidez de la construcción de éstas, manteniendo las diferencias de las cotas nombradas anteriormente. La demarcación de estas curvas se realiza con arado surcador tirado por un tractor.

c) **micronivelación pala láser:** la demarcación de las curvas de nivel se realiza en los desniveles o trazados que va dejando la propia labor de la pala láser (Foto 3). Cuando la cancha supera los 15 a 20 m de ancho, se debe realizar una ´taipa loca` por el medio de la cancha para un mejor manejo del agua.

Foto 3. Maquinaria para trazado de curvas a nivel.

Construcción de taipas y pretiles

Luego del trazado de las curvas de nivel, se deben construir las tapias con el equipo denominado taipadera (Foto 4). Éste se compone de dos cuerpos: el tren delantero, conformado por una serie de discos que van de forma perpendicular al enganche de los hidráulicos del tractor -los cuales se pueden regular para un mayor abarcamiento del suelo movido-, y el segundo cuerpo, compuesto por un rolo de forma cóncava con un ancho de 1,85 m y una concavidad de 17 cm. En primera instancia, se pasa con los discos del cuerpo delantero del equipo, rastreando por sobre la curva de nivel y el rolo lleno de agua, a una velocidad de trabajo de 4 km h^{-1}, para que se produzca un buen ´acamellonado` de la taipa. Cuando el suelo está recién nivelado con equipo láser, el orden de construcción de la taipas se realiza primero sobre la curva de nivel y, posteriormente, en la cancha. Cuando supera los 15 a 20 m de ancho, se construye una taipa que se denominada ´taipa loca`. Este procedimiento se realiza ya que las regulaciones de la taipadera son distintas. Se debe ejecutar entre otoño y primavera, idealmente en otoño, con una altura ideal de la cresta para las taipas que va desde los 15 a 17 cm, para dejar que las lluvias de invierno compacten el suelo, bajándola a 12 o 13 cm, para un mejor manejo de cultivo. La altura del pretil es de 30 cm aproximadamente.

Foto 4. ´Taipadera` para confeccionar taipas en curvas a nivel.

Drenaje

Las construcciones de los drenajes (surcos) se realizan en sentido de la pendiente con una zanjadora o un arado surcador. La cantidad de drenajes dependerá de la pendiente del terreno y de la superficie del potrero.

Preparación de suelo en siembra directa o en seco

Laboreo convencional

El laboreo convencional de suelo es el que comúnmente se utiliza en nuestro país para adoptar el sistema de siembra directa.

Mínima labranza

Este sistema consiste en alterar lo mínimo posible la condición de suelo, con el objetivo de conservar su estructura, reducir la demanda de energía para la producción del cultivo, conservar la humedad y disminuir el arrastre de partículas de suelo y la compactación (al reducir el tráfico de maquinaria sobre el campo).

Cero labranza

Es un sistema de preparación de suelo en el cual la semilla se coloca en la tierra sin removerla, con una profundidad de siembra que permita una adecuada germinación. Un aspecto a tener en cuenta para que este sistema sea eficiente es la realización de barbecho químico. Esta práctica se recomienda para potreros que hayan estado en descanso por un periodo de 1 año o que vengan de un cultivo de arroz. Para el caso en que el terreno provenga de rastrojo de arroz (monocultivo), queda una gran cantidad de paja sobre la superficie del suelo y éste debe ser acondicionado entre mayo y septiembre. El manejo ideal es retirar una cierta cantidad de paja del terreno (fardos). Sin embargo, esta práctica no se realiza en la zona por falta de maquinaria. A cambio, se realiza de la siguiente forma:

a) **Esparcimiento y picado de la paja:** tiene el problema de dejar una gran cantidad de paja sobre el suelo que no se descompone durante el invierno, ello dificulta la siembra, pues los discos no cortan la paja y la semilla no es enterrada adecuadamente.

b) **Quema de rastrojos:** los rendimientos son menores en relación a los otros sistemas.

Es necesario realizar una mayor cantidad de ensayos para perfeccionar el sistema de Cero Labranza.

Siembra directa

El método de siembra directa, como su nombre lo indica, se basa en sembrar directamente sobre el suelo con máquina sembradora, que dosifica la semilla en la cantidad determinada y la coloca en el suelo de forma de otorgarle las condiciones para la correcta germinación y posterior implantación del cultivo (profundidad, humedad, contacto suelo semilla y distribución sobre el terreno). Además, permite la aplicación de fertilizantes y otros insumos agrícolas en una determinada dosis o cantidad por hectárea. Para el método de siembra directa se usan maquinas sembradoras en líneas o de grano fino, las cuales entregan las semillas en un flujo continuo a través de los dosificadores. Las líneas están separadas en forma equidistante (Foto 5).

Foto 5. Máquina sembradora en líneas, accionada por tractor para ejecutar la siembra directa de arroz.

Para la siembra directa se pueden usar 2 tipos de máquinas sembradoras:

a) **Sembradora convencional:** Para asegurar una siembra adecuada, esta sembradora requiere un cierto grado de laboreo o preparación de suelos, es decir, que el suelo se encuentre bien mullido.

b) **Sembradora de cero labranza:** Se usa en suelos que no han sido laboreados o que tienen un laboreo mínimo, incluso con algunos terrones.

Fecha de siembra

La fecha de siembra afecta el rendimiento potencial del cultivo, por lo tanto, la época adecuada de ejecución de esta labor se debe planificar, evitando la ocurrencia de bajas temperaturas durante la fase reproductiva del cultivo; es decir, haciendo coincidir esta fase con el periodo de mayor radiación solar. Además, bajo condiciones ideales de radiación solar, la fertilización nitrogenada posee una mayor eficiencia y, por ende, es posible obtener una alta productividad del cultivo. Las fechas de siembra ideales para siembra directa son las efectuadas entre el 20 de septiembre y el 15 de octubre, considerando que, bajo condiciones edafoclimáticas adecuadas, la emergencia de la semilla demorará entre 10 y 15 d. Para lograr lo anterior y sembrar en las fechas ideales, lo fundamental es mantener un drenaje adecuado del terreno (ocurrencia de lluvias a fines de invierno y primaverales), con la finalidad de mantener las condiciones de humedad necesarias (consistencia de suelo friable) y permitir el ingreso de la maquinaria agrícola para efectuar la preparación de suelos, aplicación de herbicidas y entrada de máquina sembradora al predio.

Profundidad de siembra

La profundidad de siembra determinará la población del cultivo, es decir, las plantas m^{-2}, lo que corresponde al primer componente de rendimiento en el cultivo de arroz. La profundidad de siembra adecuada es de 2 a 3 cm, con lo que se asegura una rápida absorción de agua por parte de la semilla y contacto con el suelo, con la finalidad de obtener una rápida y adecuada germinación. La profundidad de siembra se regula a través de los limitadores de profundidad que poseen las sembradoras.

Tipo de semilla

Referente al tipo de semilla a utilizar, lo recomendable es usar semilla certificada en la mayor parte de la superficie, ya que, entre otras, su uso posee las siguientes ventajas: certificación de la variedad, pureza varietal, semillas libres de malezas, impurezas, mayor vigor y poder germinativo, alto potencial de rendimiento y uso de menores dosis de semilla por hectárea.

Dosis de semilla

La dosis de semilla que se utiliza normalmente en el sistema pregerminado, va desde los 150 kg ha^{-1} o más para siembras al voleo manual, llegando, incluso, a usar hasta 200 kg ha^{-1} en algunos casos. Mientras tanto, en siembras por avión se usan dosis que van desde los 120 hasta los 140 kg ha^{-1} (Alvarado y Hernaíz, 2007). En el caso del sistema de siembra directa, de acuerdo a lo evaluado en nuestro país, se deben usar dosis de semilla que oscilan entre 130 y 145 kg ha^{-1}. La dosis está relacionada con la variedad (tamaño y peso de semilla), calidad de la semilla y condiciones edafoclimáticas.

El cálculo de la dosis de semilla adecuada se puede realizar a través de la siguiente fórmula (INTA, 2018).

$$\text{Dosis de semilla (kg ha}^{-1}) = \frac{\text{PMG x pl m}^{-2}\text{x}10.000}{\%\ \text{P x}\ \%\ \text{PG x}\ \%\ \text{Logro}}$$

Dónde:

PMG = Peso de 1.000 granos (g).
pl m^{-2}= plantas m^{-2}.
10.000 = Factor para conversión de unidades.
% P = Porcentaje de pureza.
% PG = Poder germinativo.
% Logro = Porcentaje de plantas que pueden ser parte del rendimiento (población final).

Cabe mencionar que tanto el porcentaje de pureza (% P) y poder germinativo (% PG), para el caso de ´semillas certificadas` pueden ser extraídos desde el certificado final, otorgado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), el cual debe ser entregado al momento de la compra de la semilla.

Ejemplo de cálculo de dosis de semilla:

Datos:

PMG = 35 g (peso 1.000 granos paddy variedad ´Cuarzo-INIA`).
pl m^{-2} = 275 plantas m^{-2}.
10.000 = Factor para conversión de unidades.
% P = 99,1 %.
% PG = 90,0 %.
% Logro = 80,0 %.

Desarrollo:

$$\text{Dosis de semilla (kg ha}^{-1}) = \frac{\text{PMG x pl m}^{-2}\text{x10.000}}{\text{\% P x \% PG x \% Logro}}$$

$$\text{Dosis de semilla (kg ha}^{-1}) = \frac{35 \text{ x } 275 \text{ x } 10.000}{99{,}1 \text{ x } 90 \text{ x } 80}$$

Dosis de Semilla = 135 kg ha^{-1}

Fertilización

Por años la fertilización se ha realizado en forma manual (a caballo y a pie), avión y con trompo abonador, pero siempre en dos parcializaciones. La primera para la aplicación de fósforo, potasio y parte del nitrógeno, debiendo incorporarse en el último rastraje antes de siembra, lo que trae como resultado la pérdida de nutrientes, especialmente de nitrógeno por volatilización, desnitrificación y lixiviación. La segunda aplicación, principalmente de nitrógeno, se realiza cuando la planta está en plena macolla, entre los 40 y 50 d después de siembra, lo que puede traer como consecuencias las aplicaciones tardías, esto es, cuando las plantas ya definieron el número de macollas, o bien, la aplicación del fertilizante sobre la lámina de agua, disminuyendo la eficiencia de utilización del nitrógeno por la planta.

Análisis de suelo

El análisis de suelo es una herramienta fundamental para evaluar la fertilidad del suelo que se debe repetir, al menos, cada tres cultivos en el mismo potrero. Para ello, es de fundamental importancia que el muestreo del suelo esté bien realizado, a fin de que los resultados sean representativos del potrero.

Encalado

Los suelos ácidos requieren el agregado de Ca y Mg para mejorar su pH y la disponibilidad de estos nutrientes, con lo que mejoran, de forma indirecta, la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El suelo es más fértil cuanto mayor es la CIC. Cuando el suelo se inunda, algunos nutrientes sufren variaciones en sus propiedades químicas (pasan del estado oxidado al reducido). El cambio es mayor cuando más sea la cantidad de materia orgánica sin descomponer en el suelo, y cuanto mayor sea el tiempo de anegamiento transcurrido (INTA, 2008).

En siembra directa, la inundación se realiza entorno a los 30 d después de siembra, cuando el arroz posee de 2 a 3 hojas. Por lo tanto, las condiciones más adecuadas de pH de suelo se producen después de inundación. Esta práctica utiliza productos que actúan como agentes de corrección de la acidez del suelo, como fuentes de calcio y magnesio para las plantas, siendo el más usado el carbonato de calcio ($CaCO_3$). La necesidad de realizar el encalado y la dosis a utilizar, serán dadas por el análisis de suelo realizado. La época de aplicación recomendada es durante el otoño (4 a 5 meses antes de siembra).

Nitrógeno

El nitrógeno es el nutriente que más limita la producción de arroz, ya que afecta todos los pará-

metros que contribuyen al rendimiento. El N es requerido durante todo el periodo de crecimiento, pero la mayor demanda se presenta entre el inicio y mediados del macollamiento, y al inicio de la diferenciación del primordio floral (Guía de buenas prácticas agrícolas para el cultivo de arroz en Corrientes (INTA, 2008).

La dosis recomendada de nitrógeno es de 90 a 120 kg ha^{-1}. Para su aplicación se ha comprobado que, en siembra directa, debe realizarse en tres parcialidades:

a) **Primera parcialidad:** a la siembra, donde se debe aplicar entre un 5 % y un 10 % del nitrógeno total. La aplicación puede ser con sembradora.

b) **Segunda parcialidad:** al inicio de macolla (alrededor de 30 d después de siembra), momento en que se aplica un 60 % a 70 % del nitrógeno total. Debe realizarse en suelo seco con plantas de arroz de 2 a 3 hojas para, luego de la aplicación, no esperar más de tres d para inundar (mantener una lámina de agua permanente para evitar pérdidas de nitrógeno). De esta manera, el N aplicado con el fertilizante reduce pérdidas (volatilización y desnitrificación) y el agua solubiliza e infiltra la urea hasta la zona radicular, poniendo el N en la solución del suelo para su uso por la planta y bajo condiciones estables (Guía de buenas prácticas agrícolas para el cultivo de arroz en Corrientes (INTA, 2008).

   La aplicación en suelo seco aumenta el porcentaje de absorción por la planta en un 70 %, en suelo barroso baja a un 38 % y en agua a un 31 % (comunicación personal, asesores FLAR). La cantidad de nitrógeno aplicado, sumando ambas parcializaciones, oscila entre 65 % y 80 % del nitrógeno total. La aplicación es al voleo con trompo abonador o en forma manual.

c) **Tercera parcialidad:** a inicio de panícula, con el 20 % a 35 % del nitrógeno restante. La aplicación es manual, al voleo y sobre la lámina de agua.

Fósforo

Sus principales funciones son el transporte, almacenamiento de energía y el mantenimiento de la integridad de la membrana celular de los tejidos de la planta. El P es móvil dentro de la planta, ya que se absorbe y se mueve hacia las hojas jóvenes en crecimiento. Promueve el macollamiento, el desarrollo de la raíz, la floración temprana y la maduración. El P es particularmente importante en las primeras fases de crecimiento y la dosis es de 60 kg ha^{-1}, la cual debe aplicarse toda a la siembra con sembradora, al voleo, o con trompo abonador, antes de la siembra (sobre el suelo o incorporada con la última labor de preparación de suelo), dependiendo del método de siembra a utilizar.

Potasio

El potasio (K) es esencial para que ocurran normalmente diversos procesos en la planta. Entre éstos se puede mencionar que regula la transpiración por los estomas; transporta asimilados (producto de la fotosíntesis) hacia el grano; fortalece las paredes celulares; incrementa el área foliar y el contenido de clorofila; retrasa la senescencia; y aumenta el número de granos por panícula. La dosis de potasio para el cultivo del arroz es entre 60 y 80 kg ha^{-1}. Las aplicaciones de potasio se pueden realizar con la sembradora o al voleo con trompo abonador o manual, antes de siembra o después de siembra hasta antes de inundación.

Control de malezas

El control de malezas en el cultivo de arroz en Chile es el factor de producción más importante, ya que limita los rendimientos.

Métodos de control

El sistema de siembra en Chile se basa, mayoritariamente, en el sistema pre germinado, donde el control de malezas se efectúa en post-emergencia, por lo general con alta presión de malezas presentes que son controladas con 1 o 2 aplicaciones de herbicidas. Hay un gran número de malezas que se escapan del control de estas aplicaciones debido a:

- Al momento del control, existen malezas adultas y otras que aún no han germinado.
- A la existencia de estructuras de malezas que se propagan vegetativamente (estolones, bulbos y rizomas).
- A la falta de control de malezas sobre los pretiles.
- A la resistencia de ciertos ecotipos a determinados herbicidas.
- A la cama de semillas que existe en el suelo, la cual aumenta cada temporada.

Considerando que el sistema de siembra directa ha ido aumentando su área cultivada, se puede realizar un control integrado de malezas o usar estrategias de manejo de control como:

Control cultural: El cual corresponde a un conjunto de acciones, que contribuyen a un mejor control de malezas, entre las cuales se pueden mencionar:

- El uso de semillas de arroz libres de malezas.
- La siembra directa con cero labranza, donde la siembra se realiza sobre rastrojo o en suelos con un año de descanso, y uno o más barbechos. La aparición de malezas se reduce, debido a que el suelo no es invertido, y las semillas viables permanecen en la profundidad.
- La siembra directa con mínima labranza, donde la preparación de suelo se realiza en otoño, lo que estimula la germinación de malezas que, posteriormente, son controladas con sucesivos barbechos químicos y herbicidas pre emergentes.
- La prevención de la entrada de semillas de malezas al predio con trampas de semillas en canales de regadío, limpieza de equipos agrícolas y canales de riego, rotación de cultivos y evitando agua de riego en suelos en descanso para que no se desarrollen malezas.
- La siembra de toda el área (siembra sobre taipa), para impedir el desarrollo de malezas en superficies no cultivadas (sobre los pretiles).
- El control mecánico mediante la labranza del suelo antes de la siembra con rastra o rotofresa. Teniendo especial cuidado con las malezas que se propagan vegetativamente (rizomas, estolones, bulbos), pues este método en vez de controlarlas, contribuye a su propagación.
- La presencia de lámina de agua controla las malezas aeróbicas.

Control químico: El cual se realiza en pre-siembra o barbecho químico, pre emergencia (´punto de aguja`) y post-emergencia con herbicidas. Este método es el más utilizado debido a que, si se usa de acuerdo al estado del cultivo, al tipo de malezas, y bajo las recomendaciones técnicas, es altamente eficiente.

En el sistema pre germinado, las aplicaciones se realizan principalmente:

- En forma manual con bomba de espalda.
- Con avión, lo que puede producir deriva del producto.
- En menor escala, con pulverizadora acoplada a un tractor con rueda lenteja u hortalicera.

- Con drones, nueva técnica en uso creciente.
- En la siembra directa se puede obtener un mejor control de malezas por la posibilidad de realizar mejores aplicaciones con el equipo pulverizador conectado al tractor (volumen de agua y cobertura) en los primeros estadios del cultivo.

Foto 6. Tractor con rueda de lenteja para aplicaciones de herbicidas en arroz.

Métodos de aplicación

Pre-siembra o barbecho químico

Estas aplicaciones se realizan antes de la siembra, en los sistemas de siembra directa con o sin labranza, en otoño, invierno y/o comienzos de primavera. Los ingredientes activos utilizados se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Herbicidas utilizados en pre siembra o barbecho químico.

Ingrediente activo	Nombre común	Dosis ($L\ ha^{-1}$)	Observaciones
glifosato	Roundup 48 %, Rango 480, Roundup Ultramax, Rango 75 WG, Rango Full, Roundup Full II, Tounchdown IQ, Contador, Panzer Gold, Orion 48 L	2 - 6	Realizar el control con malezas de 2 a 4 hojas. Utilizar agua limpia.
En mezcla			
2,4 D	Esteron Ten Ten	0,4 - 0,5	-
gluroxipir-meptil	Starane Xtra	0,4 - 0,5	-
saflufenacil	Heat	50 - 80 g	-
MCPA	MCPA, U-46 M-fluid	0,4 - 1,0	Con algunos glifosatos hay incompatibilidad.

Recomendaciones

La dosis de glifosato va a depender del desarrollo de la maleza, densidad y tipo de malezas presentes. Se debe aplicar la dosis más alta con malezas adultas, con cubrimiento total del suelo y en presencia de malezas con órganos de reserva (rizomas, pivotantes, bulbos y otras). Mantener el suelo libre de malezas antes de siembra. Control de malezas de 2 a 4 hojas, es decir, en sus pri-

meros estados de desarrollo. Si el suelo se encuentra saturado o húmedo, impide el ingreso de tractor con la pulverizadora, por lo cual la aplicación se puede hacer con bomba de espalda o con drones. Es posible hacer más de una aplicación, dependiendo de la presencia de malezas.

Pre-emergencia

Los herbicidas de pre-emergencia se aplican inmediatamente después de la siembra de arroz o, como máximo, hasta antes de la aparición de las plántulas (´punto de aguja`). Los ingredientes activos utilizados se presentan en el Cuadro 2.

a) **Clomazone:** produce albinismo (blanqueamiento de la hoja) en mayor porcentaje cuando hay sobredosis de producto, traslape y en aplicaciones en punto de aguja o directas a la hoja de arroz, pero no afecta el rendimiento. Una vez aplicado, tiene mayor persistencia en un suelo que se encuentra seco, pero lo ideal es realizar un riego para su incorporación y activación del ingrediente activo. Controla hualcacho con 1 a 2 hojas.

b) **Pendimetalina:** una vez aplicada necesita un riego inmediato para su incorporación. Esto no puede demorar más de 2 d, ya que pierde efectividad.

Cuadro 2. Herbicidas utilizados en pre emergencia.

Ingrediente activo	Nombre común	Dosis (L ha^{-1})	Observaciones
clomazone	Command, Dakota.	0,5 - 0,8	En suelos arenosos las dosis son menores. En suelos arcillosos son mayores.
pendimetalina	Espada, Spectro, Herbadox.	3,0	Utilizar un 12 % menos de Herbadox.
En mezcla			
glifosato	Varios	1,5 - 3	Aplicación hasta punto de aguja.

Recomendaciones

Lo ideal es realizar todas las aplicaciones de herbicidas antes de la emergencia del arroz, para que los productos químicos no mojen su follaje. Clomazone y pendimetalina se pueden utilizar inmediatamente después de siembra, hasta el desarrollo de la planta con 3 a 5 hojas. La aplicación del pre emergente debe realizarse en punto de aguja en mezcla con glifosato, cuando ya han transcurrido 10 a 20 d después de siembra. Con esto se logra un mayor tiempo de cobertura de control de malezas. Es de gran importancia el monitoreo constante de la siembra, para realizar la aplicación de los herbicidas en punto de aguja, pasada esta etapa, no se puede aplicar glifosato. Al realizar la preparación de suelo en otoño y no hacer ningún movimiento de suelo en primavera, después de siembra se riega a los 7 a 12 d por lo que existiría piso para la pulverizadora. En cambio, en suelos labrados en primavera, se riega a los 15 a 20 d. El suelo debe encontrarse mullido, sin terrones, para una mejor cobertura y uniformidad de aplicación del producto sobre el suelo.

Post-emergencia

Se refiere a la aplicación después de la emergencia del arroz y las malezas. Debido a la alta cantidad de semillas de malezas que tienen distintas épocas de germinación, en algunas ocasiones no basta realizar barbechos químicos y controles de malezas en pre emergencia. Existen infestaciones más tardías, unos

días antes de inundación (arroz con 2 a 3 hojas) o después de la inundación. Para el control, después de inundar se puede utilizar la pulverizadora de barra con tractor (con rueda lenteja u hortalicera) (Foto 7). Queda como opción el uso de pulverizadora de espalda o avioneta (costo mayor, pero la aplicación es más homogénea), y actualmente los drones. Los ingredientes activos utilizados se listan en los Cuadros 3 a 7.

Cuadro 3. Control 1 de malezas de arroz.

Producto	Ingrediente activo	Dosis (L ha^{-1})	Época
Varios	glifosato	2 - 6	Pre siembra
En mezcla			
2,4 D	esteron Ten Ten	0,4 - 0,5	Pre siembra
Heat	saflufenacil	50 - 80 g	Pre siembra
MCPA, U-46 M-fluid	MCPA	0,4 - 1,0	Pre siembra

Cuadro 4. Control 2 de malezas de arroz.

Alternativas	Producto comercial	Ingrediente activo	Dosis (L ha^{-1})	Época
A	Command, Dakota	clomazone	0,5 - 0,8	Pre-emergencia hasta punta de aguja
	Varios	glifosato	1,5 - 3,0	
B	Espada, Spectro	pendimetalina	3,0	Pre-emergencia hasta punta de aguja
	Varios	glifosato	1,5 - 3,0	
C	Herbadox	pendimetalina	2,5	Pre-emergencia hasta punta de aguja
	Varios	glifosato	1,5 - 3,0	
D	Command, Dakota	clomazone	0,5 - 0,8	Post-emergencia hasta arroz con 2 a 3 hojas
	Post emergentes	Varios	Control 3	
E	Espada, Spectro	pendimetalina	3,0	Post-emergencia hasta arroz con 2 a 3 hojas
	Post emergentes	Varios	Control 3	

Foto 7. Tractor de ruedas altas con pulverizadora aplicando herbicida.

Foto 8. Arroz después de aplicado el herbicida post-emergente.

Cuadro 5. Control post-emergencia de malezas en arroz.

Ingrediente Activo	Producto comercial	Sólo (dosis ha^{-1})	Mezcla (dosis ha^{-1})	Época
rinskor	Loyant	1,2	1,2 L	Post-emergencia hasta finales de macolla en arroz (45 a 50 d después de siembra). Con malezas de 2 a 4 hojas.
Mezcla				
triclopyr	Garlon	-	0,5 - 0,75 L	
quinclorac	Exocet	1,5 - 2,0 L	0,8 - 1,0 L	
	Facet	1,5 - 2,0 L	1,0 - 1,2 L	
Mezcla				
penoxsulan	Ricer	-	140 - 150 mL	
cyhalofop – butilo	Clincher	-	1 - 2 L	
bentazone	Bentax – Basagran	-	1,0 - 1,5 L	
MCPA	MCPA	-	100 - 300 mL	
triclopyr	Garlon	-	0,5 - 0,75	
cyhalofop	Clincher	1,5 - 2,5 L	1,0 - 1,2 L	
Mezcla				
quinclorac	Exocet	-	1 L	
quinclorac	Facet	-	1,0 - 1,2 L	
penoxsulan	Ricer	-	140 - 150 mL	
bentazone	Bentax - Basagran	-	1,0 - 1,5 L	
triclopyr	Garlon	-	0,5 - 0,75 L	
penoxsulan	Ricer	200 - 230 mL	140 - 150 mL	
Mezcla				
quinclorac	Exocet	-	0,8 - 1,0 L	
quinclorac	Facet	-	1,0 - 1,2 L	
cyhalofop – butilo	Clincher	-	1,0 - 2 L	
bentazone	Bentax- Basagran	-	1,0 - 1,5 L	
MCPA	MCPA	-	100 - 300 mL	
triclopyr	Garlon	-	0,5 - 0,75 L	

Cuadro 6. Control de hualtata, cortadera y pasto cabezón.

Ingrediente Activo	Producto	Solo (dosis ha^{-1})	Mezcla (dosis ha^{-1})	Época
MCPA	MCPA	0,4 - 1,3 L	0,3 – 0,7 L	Post-emergencia hasta finales de macolla en arroz (45 a 50 d después de siembra). Con malezas de 2 a 4 hojas. MCPA aplicar desde inicio a fin de macolla. Garlon y Bentazone desde 2 hojas a fin de macolla.
Mezcla				
triclopyr	Garlon	-	0,5 - 0,75 L	
bentazone	Bentax - Basagrán	-	1,0 - 1,5 L	
triclopyr	Garlon	0,5 – 0,75 L	0,5 - 0,75 L	
Mezcla				
bentazone	Bentax - Basagrán	-	1,0 - 1,5 L	
MCPA	MCPA	-	0,3 - 0,7 L	

Cuadro 7. Resumen control de malezas recomendado para siembra directa.

	Control 1	Control 2		Control 3
Producto	Varios (Roundup, Rango, etc.)	Espada (1), Spectro (1), Herbadox (1) o Command (2)	Varios (Roundup, Rango, etc.)	Varios (Loyant, Ricer, Bentax, Basagran, Clincher, Facet, Exocet, Garlon y MCPA).
Ingrediente activo	glifosato	pendimethalin (1) o clomazone (2)	Glifosato	Rinskor, Penoxsulan, Bentazon, cyhalofop-butyl, quinclorac, Triclopyr y MCPA.
Dosis	2 - 6 L ha^{-1}	2,5 a 3,0 L ha^{-1} (1) 0,5 a 0,8 L ha^{-1} (2)	1,5 - 3,0 L ha^{-1}	De acuerdo al producto utilizado.
Época	Pre siembra	Pre emergencia hasta punta de aguja.		Post-emergencia.

Recomendaciones. Realizar las aplicaciones en suelo barroso o con lámina de agua (no en suelo seco ya que produce pérdida de efectividad de los herbicidas). Una vez inundado, realizar un monitoreo permanente de la presencia de malezas para tomar las medidas correctivas. Después de inundado el arroz, se debe realizar el control de malezas con 1 a 2 hojas y no esperar a que se desarrollen, es decir que sobrepasen la altura del arroz. Se pone énfasis en este punto, ya que los agricultores no realizan adecuadamente esta labor, por lo que deben utilizar altas dosis de producto químico, el que cae sobre las hojas de arroz afectando directamente su rendimiento.

Manejo del riego

Aspectos generales

El cultivo de arroz, sembrado bajo el sistema pre germinado, se mantiene inundado o con lámina de agua desde antes de siembra (llenado de cuadros) hasta las etapas de floración a grano lechoso, dependiendo de la capacidad de retención de humedad del suelo. Lo anterior involucra la utilización de grandes volúmenes de agua, lo que puede incluso superar los 1,6 L s^{-1} ha^{-1} (Her-

naíz y Alvarado, 2007). El sistema de siembra directa permite ahorrar sobre un 20 % de agua con respecto al sistema pre germinado, dado que a los menos en los primeros 25 a 30 d después de siembra no se inunda el terreno, sino que sólo se efectúan riegos o ´mojamientos` para ayudar a la germinación de la semillas y posterior emergencia de las plantas (2 o 3 riegos dependiendo del tipo de suelo y condiciones climáticas de cada temporada), además de permitir manejar menores niveles de agua.

Fuentes de aguas

Las comunas de Parral, Retiro y Ñiquén (principales comunas arroceras del país) utilizan como fuente de riego, en su mayoría, aguas superficiales y corrientes provenientes del sistema de riego Digua. Esta organización utiliza los excedentes de los ríos Longaví, Perquilauquén y Cato, y los acumula en el Embalse Digua que posee una capacidad de 225.000.000 m^3, considerando, además, la capacidad total del sistema de 400.579.000 m^3 (85 % seguridad riego). Este sistema se compone de 31.850 acciones (12.577 m^3 por acción), de las cuales 27.314 corresponden al área Parral (Retiro-Parral) y 4.536 acciones al área Ñiquén (Fuente: www.embalsedigua.cl). Otra fuente de riego utilizada, y no menos importante, son las aguas subterráneas extraídas desde acuíferos mediante elevación mecánica (bombas sumergibles, electrobombas o motobombas) desde captaciones del tipo pozo profundo, dren o zanja.

Diseño predial

Para el manejo del riego del cultivo de arroz sembrado bajo sistema de siembra directa, lo ideal es diseñar el predio y/o potrero pensando en las entradas y salidas de agua (Parada et al., 2013). De esta manera, se debe considerar la construcción de los siguientes elementos del diseño predial.

Canales de avance

Permiten ingresar de forma rápida y uniforme el agua a la cancha o cuadros. Esto es fundamental al momento de efectuar los ´mojamientos`, inundación definitiva del cultivo u otras prácticas que requieran manejar los niveles de agua, como el control de malezas (Foto 9).

Foto 9. Canales de avance.

Drenajes

Permiten extraer rápidamente el agua (desaguar) desde los cuadros o cancha, luego de realizar los riegos previos a la inundación del cultivo. Además, mantienen el suelo en condiciones adecuadas de humedad después de las precipitaciones de invierno y principios de primavera, para facilitar el establecimiento de la siembra y las labores posteriores de manejo del cultivo.

Primer riego

El primer riego se debe realizar inmediatamente después de la siembra o cuando las condiciones de humedad del terreno no sean las adecuadas para la correcta germinación de las semillas. Esto se podría comprobar a través de la revisión visual y al tacto del suelo. El riego se efectúa aplicando una lámina de agua que permita llegar a, lo menos, al doble de la profundidad de siembra. Respecto al tiempo de riego, se debe asegurar de mantener el terreno inundado alrededor de 2 d, para asegurar que la semilla se embeba y ocurra una germinación uniforme. Terminado el riego, se deben drenar los excesos de agua para evitar que existan pérdidas de semillas por exceso de humedad ya que, bajo condiciones de anegamiento, se tiende a afectar el embrión por falta de oxígeno, tanto al impedir la entrada de aire, como al quedar el agua atrapada entre los tejidos de la semilla durante el proceso de imbibición. De esta manera, la semilla no puede germinar o, si logra emerger la radícula, la plántula de arroz se verá afectada y disminuirá el número de plantas establecidas por unidad de superficie.

Segundo y tercer riego

El segundo riego se debe efectuar dependiendo de la emergencia de las plantas y del contenido de humedad del suelo. Como parámetro, se pueden utilizar los siguientes criterios para determinar el momento de su ejecución:

- Estado de desarrollo de ´punto de aguja`.
- Momento de aplicación de herbicidas pre emergentes (por ejemplo, ingredientes activos pendimetalina y clomazone).
- Encostramiento de la superficie del terreno y suelo seco alrededor de las semillas o plantas.

El tercer riego se efectúa en caso que las condiciones de humedad de suelo no sean las suficientes para asegurar un buen establecimiento de las plantas. Si durante la primavera ocurren precipitaciones por sobre 20 mm después de sembrado el arroz, se ahorra un riego.

Inundación del cultivo

La inundación del arrozal se debe realizar cuando el cultivo presente de 2 a 3 hojas (Foto 10), estado de desarrollo en el cual también se debe efectuar la aplicación del nitrógeno y evaluar el control de malezas post-emergentes. La inundación se debe realizar inmediatamente después de estos manejos, para evitar las pérdidas de nutrientes y mejorar la eficiencia de los herbicidas aplicados. La inundación se efectúa a un cuarto de altura de la planta. Luego, el manejo del agua se hará de acuerdo al crecimiento de las plantas, considerando la protección del punto o base de crecimiento de la panícula, de acuerdo al desarrollo del cultivo. La regla general es inundar, aproximadamente, a los 30 d después de siembra, momento en el cual las plantas se encuentran en el estado de desarrollo de 2 a 3 hojas. En todo caso, ello dependerá de que se haya sembrado con condiciones adecuadas de humedad y temperatura.

Foto 10. Inundación del arroz bajo siembra directa, con 2 a 3 hojas de desarrollo.

Niveles de agua

El nivel de agua o de humedad en el suelo es esencial para mantener un adecuado manejo de la fertilización y control de malezas. En el sistema de siembra pre germinado, el cultivo está permanentemente con agua, incluso desde 5 a 15 d antes de siembra, hasta el estado de grano lechoso o pastoso (120 a 130 d después de siembra). De esta manera, el cultivo se encuentra inundado entre 125 a 145 d (Cuadro 8).

Cuadro 8. Niveles ideales de agua utilizados en sistema pregerminado.

Niveles de agua (cm)	Estado de desarrollo	Días después siembra
5 a 10	Siembra – Inicio de panícula	0 – 60
10 a 20	Inicio de panícula – Floración	60 – 100
20	Floración – Grano pastoso	100 – 130

En el caso del sistema de siembra directa (dentro del cuadro o sobre taipa), lo normal es que se realicen hasta 2 riegos antes de la inundación del cultivo, manteniendo el cultivo inundado entre 15 a 20 d después de floración. El corte del agua se realiza cuando el grano de arroz se encuentra con consistencia lechosa a pastosa, dependiendo del tipo del suelo. Respecto a los niveles ideales de agua que se deben utilizar en este sistema, éstos se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Niveles ideales de agua utilizados en sistema de siembra directa (sobre taipa y dentro del cuadro).

Sector	Niveles de agua (cm)	Estado desarrollo	Días después siembra
Cancha	6 a 10	Inicio macolla (30 d después de siembra) – Grano pastoso.	30 - 130
Préstamo	12 a 16		
Taipa	0 (saturado)		

Requerimientos de agua del cultivo

Existe una gran diferencia en cuanto a los requerimientos hídricos del cultivo de arroz de acuerdo al sistema de siembra que se utilice. La siembra directa (dentro del cuadro y sobre taipa) permite utilizar menores caudales y, por lo tanto, un menor consumo de agua por parte del cultivo con respecto al sistema de siembra pre germinado.

Durante la temporada 2017-2018, la consultora Agro-Parral efectuó la cuantificación del consumo de agua en el cultivo de arroz en ambos sistemas de siembra, mediante la instalación de caudalímetros en los predios de productores que regaron con aguas subterráneas elevadas de forma mecánica. Los resultados preliminares del consumo de agua, fueron: siembra directa sobre taipa 11.794 m^3 ha^{-1} y siembra pre germinado 20.055 m^3 ha^{-1}.

Cosecha

Aspectos generales

La cosecha es la última labor que se realiza en el proceso productivo del cultivo del arroz, antes de trasladar el producto a los distintos puntos de compra. En la programación de la cosecha hay diferentes factores que se deben tener presentes antes de su inicio: fecha de corte de agua, humedad del grano, humedad del suelo, disponibilidad de máquinas cosechadoras, su regulación y velocidad de trabajo, y el transporte hacia el poder comprador. Es necesario realizar una cosecha de forma rápida y fácil para evitar las pérdidas, y obtener granos de arroz de buena calidad para su posterior elaboración. Es importante comprometer y tener contratado el servicio de cosecha, ya que la demanda por conseguir los servicios de una cosechadora es alta, especialmente porque éstas brindan también servicios al sector maicero. Uno de los componentes mecánicos que se debería incorporar en todas las cosechadoras, es el picado y esparcimiento de la paja para un mejor manejo de rastrojos.

Foto 11. Máquina cosechadora pasando sobre las taipas.

Fecha de corte de agua

La fecha de corte de agua coincide con el estado de grano lechoso del arroz. Esto ocurre, aproximadamente, a los 120 d desde la emergencia. Una vez cortada el agua, se debe dejar que se consuma de forma natural. De esta forma se llegará a cosecha con un piso en condiciones, para que las máquinas cosechadoras trabajen eficientemente.

Humedad del suelo a cosecha

Se debe realizar una cosecha con suelos secos, para que la automotriz no se entierre. Cuando los suelos están saturados de agua, la automotriz y el carro cerealero o ´catango` se entierran y dejan huellas profundas de 20 a 50 cm. En esos casos, la fuerza producida por la automotriz se destina a la tracción de las ruedas más que a la cosecha del grano. Además, al dejar las huellas en los potreros, necesariamente después deben efectuarse trabajos de nivelación y movimiento de suelos, lo que encarece los costos de producción.

Humedad del grano

Es importante monitorear la humedad del grano antes y al momento de la cosecha, ya que lo ideal es trillar con una humedad del grano de entre 18 % y 20 %. Ello minimiza las pérdidas de cosecha y aumenta el rendimiento industrial. Menores humedades incrementan el peligro del acame o de desgrane. La humedad del grano se mide con el humedímetro para decidir el inicio de cosecha.

Hora de inicio de cosecha

Para iniciar la cosecha, se evita el rocío de la mañana. El término de la hora de la cosecha dependerá de las condiciones climáticas del día, por ejemplo, ante el inicio del rocío. Una manera práctica para saber cuándo detener la cosecha, consiste en revisar la automotriz. Si ésta va dejando panículas sin trillar, se detiene la cosecha para evitar pérdidas.

Regulación y velocidad de trabajo de una cosechadora

Si bien el productor de arroz no tiene injerencia sobre la regulación de la cosechadora, debe conocer el procedimiento, ya que es una instancia de pérdidas de grano. Así, puede supervisar la cosecha, detectar los problemas tempranamente y solicitar los cambios pertinentes. Es importante controlar la velocidad de trabajo que debe oscilar entre 3 y 4 km h^{-1}. Al trabajar a mayores velocidades, la máquina resta potencia a todos los elementos mecánicos de corte, trilla y selección de granos, lo que provoca un aumento en la pérdida de granos.

Evaluación de pérdidas en cosecha

Pérdidas en precosecha o naturales

Las pérdidas en precosecha se producen de forma natural, por factores climáticos y/o volcamiento del cultivo. Una pérdida eventual debe evaluarse con anticipación, según el siguiente método de evaluación.

Procedimiento de evaluación de pérdida en pre cosecha:

- Elegir un sector del potrero homogéneo y representativo del cultivo.
- Lanzar el aro sobre el potrero cuatro veces (representa 1 m^2) y recolectar los granos, panojas sueltas y todas aquellas que no estén a la altura de corte del cabezal, para luego desgranarlas.

- Recolectar los granos dentro del recipiente.
- Mezclar las cuatro mediciones dentro del recipiente y pesarlas.

Basados en este procedimiento, se ha estimado que pérdidas a la cosecha de 285 granos m^{-2} pueden equivaler a 100 kg ha^{-1}.

Pérdidas en la cosecha

La medición de pérdidas en la cosecha es importante y no todos los agricultores la evalúan. Ello permite determinar si la cosechadora está bien regulada y en condiciones de prestar el servicio. Además, permite detectar dónde se producen las pérdidas, para hacer los ajustes y regulaciones. Para la evaluación de posibles pérdidas de la cosecha del cabezal (sección de corte) y de la sección de trilla, se utilizan los mismos materiales ya descritos y bajo la siguiente metodología.

- Elegir un sector del potrero homogéneo y representativo de la siembra.
- Lanzar el aro cuatro veces y recolectar los granos y panojas sueltos.
- Recolectar los granos dentro del recipiente.
- Juntar las cuatro mediciones dentro del recipiente y pesarlas.

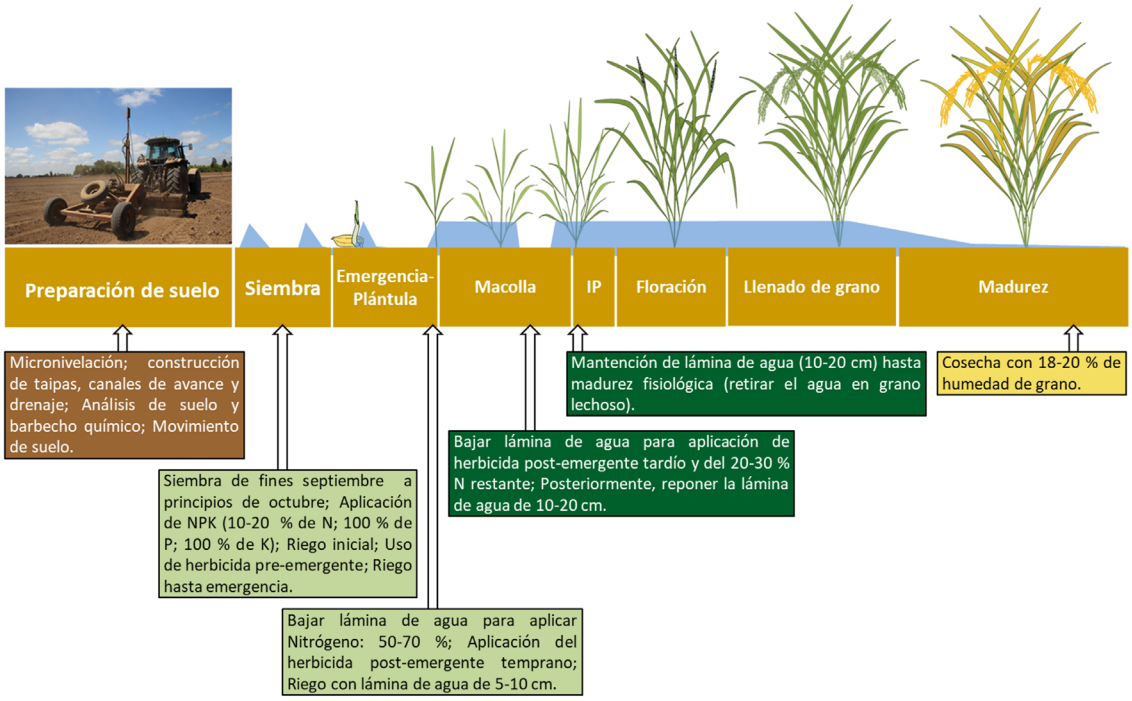
Las pérdidas de cosecha se estiman con la relación antes mencionada. Luego, para obtener un resultado final de estas dos mediciones, se descuentan las pérdidas normales a los obtenidos por la cosecha.

Traslado del arroz hacia el poder comprador

El traslado hacia el poder comprador se hace en camiones que trasportan el arroz a granel. Éstos deben estar acondicionados para dicha tarea y no deben presentar materiales físicos en su interior (semillas, piedras, palos, etc.) ni fisuras (roturas en los carros). Además, deben contar con carpas para proteger el producto del rocío y lluvias. El traslado hacia el poder comprador debe ser realizado apenas se cargue el camión.

Resumen de las principales actividades a realizar en el sistema de siembra directa de arroz

Es necesario considerar que este sistema puede incluir preparación de suelo convencional, mínima labranza y cero labranza (Figura 1).



Fuente: Elaboración: Donoso, G., 2021.

Figura 1. Sistema de producción de arroz siembra directa.

Referencias

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.

Hernaíz. S., Alvarado, R. 2007. Manejo del agua en el arrozal. p. 49-57. En Alvarado R. (ed.) Arroz Manejo Tecnológico. Boletín INIA Nº162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA. 2008. Guía de Buenas prácticas agrrícolas para el cultivo de arroz en Corrientes. 94 p. INTA y Asociación Correntina para plantadores de arroz. ACAPA, Corrientes, Argentina.

Parada, J., Riquelme, J., Paredes, M. 2013. Siembra de arroz en seco: manejo agronómico general. Tierra Adentro (ed. Especial): 104:11-15.

Capítulo 32. Sistema de producción Clearfield® en arroz

Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ., Juan Hirzel C., Jorge Nitsche M., Fernando Jofré S-G., Ángela Aedo A., Nicolás Silva L.

Uno de los principales factores limitantes de la producción arrocera en Chile, es un efectivo control de malezas. Las malezas pueden producir una fuerte disminución de la producción y calidad del producto cosechado, desde un 40 % a un 60 %, dependiendo de la intensidad y período de competencia con las malezas. Existen, principalmente, tres grupos de malezas que afectan el rendimiento del arroz en Chile (Alvarado, 2007; Pedreros et al., 1992). En primer lugar, la *Echinochloa* spp., más conocida como hualcacho, que puede llegar a reducir los rendimientos entre un 25 y un 49 %. Le siguen otras pertenecientes a la familia de las Ciperáceas (*Cyperus difformis,* cortadera y *Scripus mucronatus,* pasto cabezón), las cuales reducen el rendimiento entre un 16 % y un 48 %, y finalmente otras de la familia de las Alismatáceas (hualtatas y lengua de vaca) que disminuyen el rendimiento entre un 11 % y hasta un 68 %. A estas malezas se debe agregar el arroz rojo (*Oryza sativa*) que existe en sus dos tipos: arroz rojo *japonica* e *indica* (Alvarado y Pedreros, 1991). La presencia de esta maleza está asociada a la introducción del arroz al país y se encuentra diseminada en toda la zona arrocera en diferentes porcentajes (Alvarado y Pedreros, 1991). La norma en Chile permite el uso de semillas comerciales con una semilla de arroz rojo en cada 500 g de semilla.

Basado en lo anterior, se presentó la necesidad de implementar en Chile el Sistema de Producción Clearfield® (Cl) que conceptualmente es un sistema de producción agrícola de BASF que incluye tres componentes esenciales: A) variedad Clearfield® con el gen de resistencia a los herbicidas de la familia de las imidazolinonas (IMI); B) un herbicida específico Clearfield®: Eurolightning® y; C) Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en arroz Clearfield®.

A) Variedad de arroz Clearfield® con el gen de resistencia a los herbicidas de la familia de las imidazolinonas (IMI)

Generación de la variedad de arroz Clearfield

Los progenitores seleccionados para la obtención de las líneas experimentales Clearfield (Cl) fueron ´Zafiro-INIA`, como padre recurrente, y ´Puitá-INTA` como padre donante del gen de la resistencia al herbicida de la familia de las imidazolinonas (IMI). Los genes de resistencia presentes en la variedad ´Puitá-INTA` fueron donados a INIA por Basf S.A., para el desarrollo de esta variedad.

La transferencia del gen se realizó a través de cuatro retrocruzas (Figura 1). Se utilizó, además, el cultivo de embriones para acelerar el avance de las generaciones y acortar el tiempo de desarrollo de las líneas experimentales Cl. Estas líneas experimentales Clearfield se seleccionaron, en cada etapa, mediante la aplicación del herbicida Eurolightning (BASF) y la verificación de la presencia del gen en las plantas que sobrevivieron mediante el uso de marcadores moleculares asociados al gen de resistencia IMI (Figura 1).

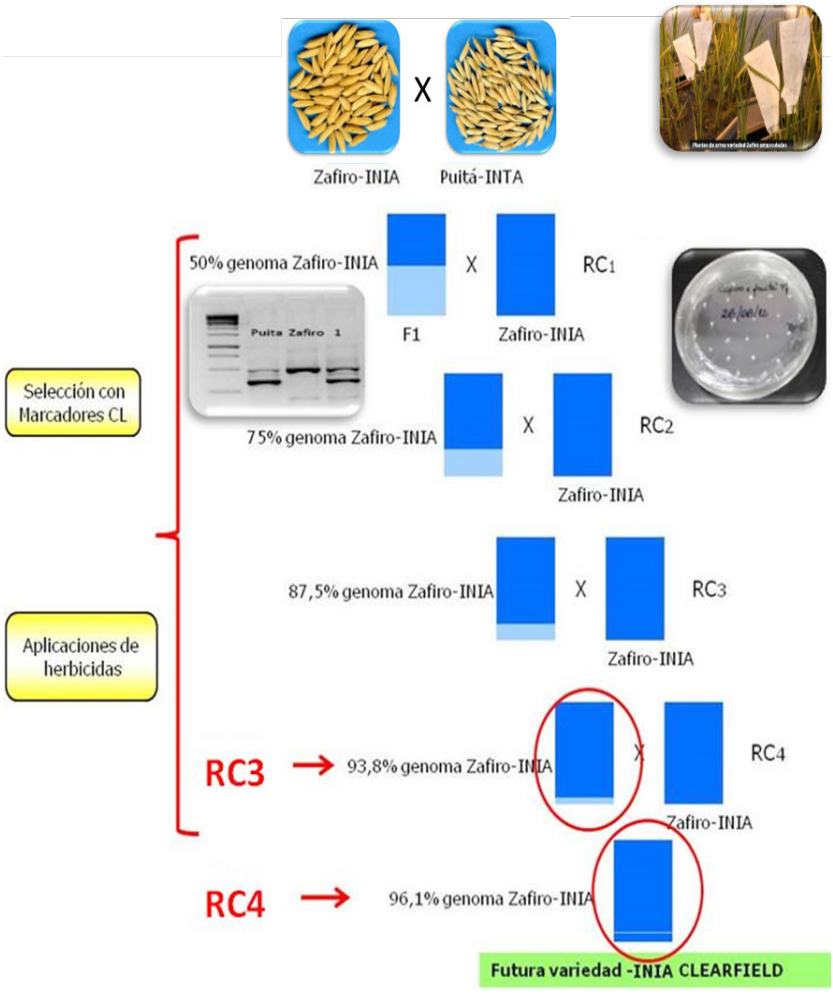


Figura 1. Estrategia de desarrollo de las líneas experimentales Clearfield en arroz.

Evaluación y selección en condiciones de campo de líneas Clearfield

A partir de la temporada 2014-2015, para verificar la resistencia de las líneas experimentales RC3 Cl y RC4 Cl al herbicida a nivel de campo, se les aplicó el herbicida Eurolightning en dosis de 3 L ha^{-1}, al estado de 2 a 4 hojas y sin lámina de agua. La lámina de agua se restableció a las 48 h posteriores a la aplicación.

La evaluación de la resistencia del herbicida en las líneas Cl se realizó a los 7, 14 y 21 d después de la aplicación del herbicida Eurolightning (IMI). Las líneas Cl no mostraron fitotoxicidad, en cambio, las plantas de ´Zafiro-INIA` presentaron los primeros síntomas de clorosis y necrosis a los siete d, lo que continuó con la necrosis y muerte total de las plantas entre los 14 y 21 d (Foto 1). Estos resultados indicaron claramente que las líneas experimentales Cl poseían el gen de resistencia.

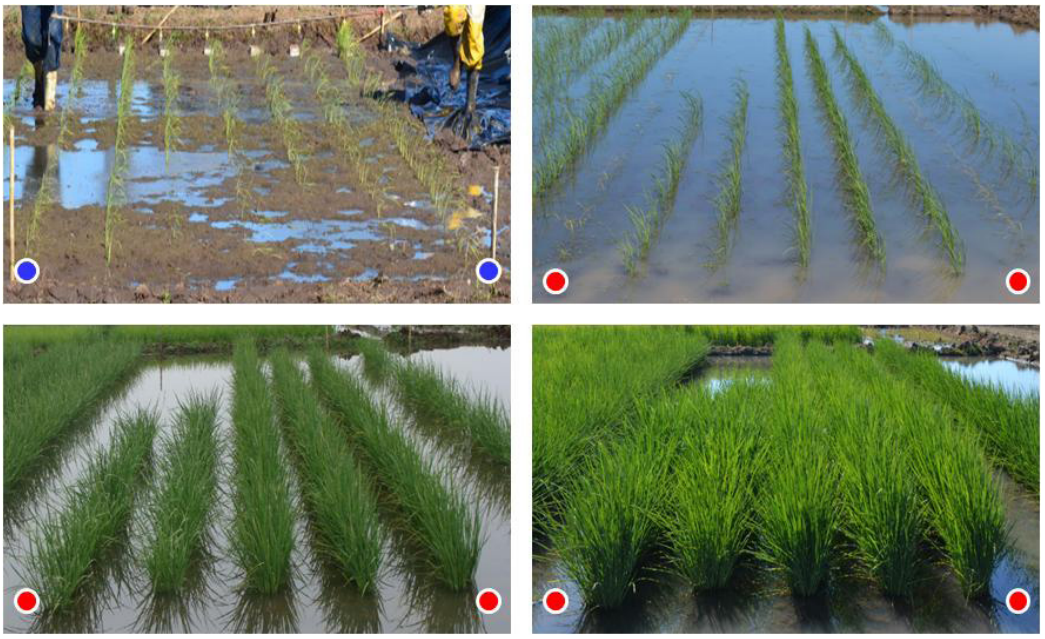


Foto 1. Evaluación de líneas experimentales Clearfield en San Carlos. Puntos azules indican la hilera inicial con plántulas de ´Zafiro-INIA` durante la aplicación de Eurolightning. Los puntos rojos indican las hileras sin ´Zafiro-INIA`, debido a que al no tener el gen de resistencia del herbicida IMI, desaparecieron completamente a los 21 d.

Evaluación agronómica y de calidad de grano de 'Digua Cl'

Desde el 2015 al 2018 se evaluaron 24 líneas experimentales de arroz RC4 Cl y RC3 Cl a nivel de campo en las localidades de San Carlos, Parral y Linares, considerando ´Zafiro-INIA` como testigo. Esta información permitió seleccionar la línea experimental que fue registrada en el Servicio Agrícola Ganadero, SAG, con el nombre comercial de ´Digua Cl`. Los resultados agronómicos más importantes que definieron a ´Digua Cl` como variedad fueron:

1. Tipo de grano

La primera característica agronómica comercial que debe poseer una variedad de arroz en Chile es tener un grano largo-ancho. Actualmente, más del 95 % del arroz sembrado en el país posee este tipo de grano. Los tipos de grano de arroz que se comercializan en el país están descritos en la Norma Chilena de Comercialización del Arroz, publicada por el Instituto Nacional de Normalización (INN) NCh 1375.Of88, NCh 1359.Of2003, NCh 2033.Of2003; INN, 1999; 2003a; 2003b).

La Norma Chilena de Comercialización del Arroz dice que el tipo de arroz largo ancho debe tener una relación largo/ancho menor a 3. La variedad ´Digua Cl` presentó un grano con una relación largo/ancho de 2,8 a 2,9, similar a la variedad comercial ´Zafiro-INIA`, en las tres temporadas evaluadas en las localidades de Linares, Parral y San Carlos.

2. Rendimiento en grano (t ha^{-1})

Durante las tres temporadas en las localidades evaluadas, no hubo diferencias significativas en el rendimiento en grano paddy entre ´Digua Cl` (9,5-11,3 t $ha^{-1}$) y el testigo ´Zafiro-INIA` (9,8-11,7 t ha^{-1}) (Foto 2). Esta situación era de esperar, al ser ´Digua Cl` una variedad derivada de ´Zafiro-INIA`.

Foto 2. Ensayos regionales de líneas experimentales Clearfield en San Carlos, Parral y Linares. Temporada 2017-2018.

Rendimiento industrial: grano entero (%)

La calidad industrial, expresada como grano entero, es otra característica muy importante en la producción y comercialización del arroz, ya que incide en el precio del producto pagado tanto por la industria como por los consumidores. En las tres temporadas y comunas evaluadas, ´Digua Cl` presentó un porcentaje de grano entero que osciló entre 64 % y 68 %, similar al de ´Zafiro-INIA` (63 % a 68 %).

3. Otras características agronómicas y de calidad de grano

´Digua Cl` posee un grano de color marrón claro, fusiforme y traslúcido después de su elaboración. La altura de planta está entre los 85 y 106 cm. Tiene un período de siembra a cosecha de 160 d, lo que la clasifica como tardía. Su panícula es de tipo intermedia, no compacta ni abierta, con un 100 % de excersión del tallo. Las panículas presentan un bajo porcentaje de esterilidad (apical y basal) y un bajo porcentaje de desgrane.

El grano pulido de ´Digua Cl` posee un grado de panza blanca de 0,1 a 0,4; porcentaje panza blanca 8 a 18; blancura 38 a 40; transparencia entre 3,5 y 3,9; contenido de amilosa intermedio de 25 % a 26 %; y una baja temperatura de gelatinización entre 63 y 68 °C, valores similares a la variedad ´Zafiro-INIA`.

4. Enfermedades

No se observaron presencia de enfermedades ni plagas.

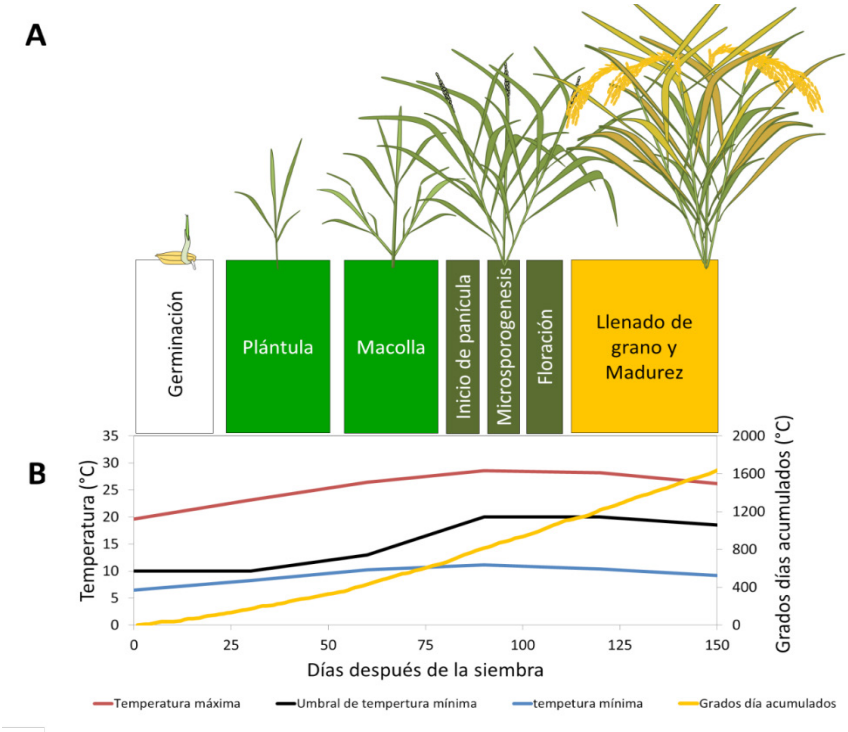
5. Tolerancia al frío de la variedad ´Digua Cl`

El arroz es un cultivo de origen tropical que requiere temperaturas superiores a otros cultivos para su correcto desarrollo (Hatfield y Prueger, 2015). Cuando las temperaturas están bajo el óptimo necesario para el desarrollo de esta planta, el cultivo puede presentar considerables disminuciones en los rendimientos en grano.

A nivel mundial, se ha reportado reducción en los rendimientos debido a bajas temperaturas de hasta 26 % en Corea (Lee, 2001), 44 a 80 % en Japón (Shimono et al., 2007) y 60 % en Brasil. Este fenómeno puede generar pérdidas económicas de hasta 23 millones de dólares en países como Australia (Farrell et al., 2001).

Chile es el país más austral del mundo donde se cultiva arroz (Donoso et al., 2016), con gran cantidad de eventos climáticos asociados a temperaturas que están bajo el umbral necesario para el desarrollo de una planta de arroz. Internacionalmente, Chile ha sido clasificado dentro de los países en donde se cultiva el arroz con temperaturas que están bajo el óptimo para la especie (IRRI, 1983).

En la Figura 2, se muestran los promedios de temperaturas mínimas de 40 años, en el sector más austral de la zona arrocera de Chile. Las temperaturas mínimas promedio están bajo las temperaturas críticas definidas para este cultivo, principalmente desde el inicio de macolla en adelante. Los principales efectos de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz son: disminución del crecimiento del coleóptilo durante la germinación (Da Cruz et al., 2006; Donoso et al., 2013), crecimiento desuniforme de las plantas y clorosis foliar en la etapa de plántula (Da Cruz et al., 2006; Donoso et al., 2015), y esterilidad floral durante la etapa reproductiva (Da Cruz et al., 2013; Shimono et al., 2007), lo que incrementa el fenómeno de vanazón en el cultivo. La etapa reproductiva es la más sensible a las bajas temperaturas, donde temperaturas promedio bajo 18 °C pueden causar esterilidad floral sobre un 70 %, lo cual produce serias pérdidas económicas (Alvarado, 2007).



Fuente: datos obtenidos de estación meteorológica de la Universidad de Concepción, sede Chillán.

Figura 2. Fenología del arroz y temperaturas presentes en el sector arrocero de Chile. (A) diferentes etapas fenológicas del cultivo del arroz en Chile. (B) temperaturas mínimas y máximas registradas durante 40 años, temperatura mínima óptima descrita en la literatura para el cultivo de la especie y tiempo térmico expresado en acumulación de grados día (base 10 °C).

Debido a que las nuevas variedades de arroz que se generan en nuestro país, deben contar con niveles de tolerancia a bajas temperaturas al estado de germinación, plántula y estado reproductivo, la nueva variedad de arroz ´Digua Cl` fue evaluada en las tres etapas críticas, en condiciones de laboratorio.

Etapa de germinación

Para evaluar la capacidad de germinación ante un evento de baja temperatura, las semillas de ´Digua Cl`, ´Zafiro-INIA` (testigo tolerante a frío) y ´Oryzica 1` (testigo susceptible al frío) fueron sometidas a 12 °C constantes, durante 20 d en una incubadora. Para los resultados, se consideró como tolerantes al frío los genotipos con una germinación superior a 60 %. Las variedades ´Digua Cl` y ´Zafiro-INIA`, entre otras, pueden ser consideradas como tolerantes al frío, basadas en la elongación del coleóptilo. La Foto 3A muestra que la variedad testigo susceptible ´Oryzica 1` no logró germinar en el tiempo establecido, mientras ´Digua Cl` (Foto 3B) germinó en más de un 90 %.

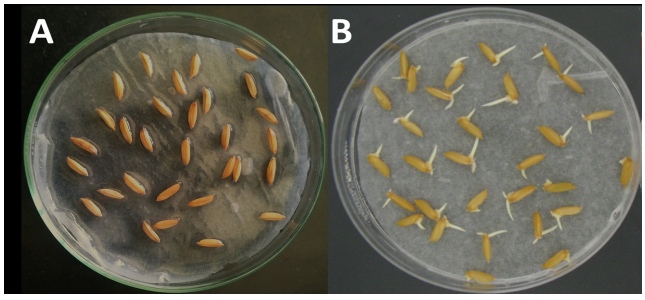


Foto 3. Germinación en condiciones de bajas temperaturas de la variedad de arroz ´Digua Cl`, de la variedad sensible a frío ´Oryzica 1` (A) y de la nueva variedad ´Digua Cl` (B).

Etapa de plántula

Para la evaluación de la tolerancia al frío en la etapa de plántula de la variedad ´Digua Cl`, se utilizaron plantas de tres a cuatro hojas que se sometieron a 5 °C durante la noche (12 h), en una cámara bioclimática, por cuatro d seguidos. Durante el día las plantas fueron iluminadas con luces LED (Valoya B200), con 300 µmoles de fotones m^{-2} s^{-1} y a 25 °C. Luego del tratamiento de frío, fueron trasladadas, para su recuperación, a temperaturas de 21 °C en la noche, 25 °C durante el día y por 7 d. Posteriormente, se evaluaron los niveles de clorofila mediante clorofilómetro (AtLEAF), el cual se relaciona con el color verde de la hoja. La variedad ´Susan` fue usada como testigo tolerante y ´Oryzica 1` fue usado como testigo susceptible.

´Oryzica 1` no sobrevivió al tratamiento y presentó una importante disminución del contenido de clorofila al momento de la evaluación (Foto 4C). En cambio, la variedad ´Digua Cl` no mostró una disminución importante en sus niveles de clorofila, al ser comparada con el control sin frío (Foto 4A) y con la variedad tolerante ´Susan` (Foto 4B).

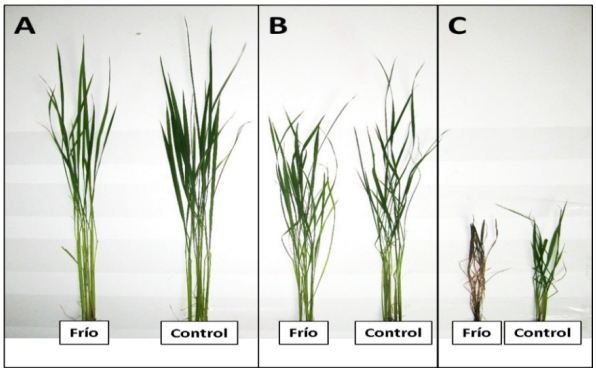


Foto 4. Efecto del tratamiento de frío en la etapa de plántula sobre ´Digua CL` (A), ´Zafiro-INIA` (B, testigo tolerante a frío) y ´Oryzica 1` (C, testigo susceptible al frío). Las plantas tratadas con bajas temperaturas se muestran a la izquierda dentro de cada variedad.

Etapa reproductiva

La evaluación de la tolerancia a frío en la etapa reproductiva de la variedad ´Digua Cl`, se realizó utilizando ´Zafiro-INIA` (testigo comercial), PT 11 (testigo susceptible) y PT 12 (testigo tolerante), en una casa de malla con un 36 % de reducción de luz. Las plantas fueron crecidas en estas condiciones hasta el estado reproductivo (microsporogénesis). El tratamiento de frío consistió en someter las plantas de arroz en la etapa de microspora temprana, a temperaturas de 25 °C durante el día y 5 °C durante la noche, por 5 d seguidos, con un fotoperiodo de 16 h (luz LED, Valoya AP67), en una Cámara Bioclimática, con monitorización y control automatizado de la temperatura y el fotoperiodo.

La evaluación consistió en la medición de la esterilidad floral. La nueva variedad de arroz ´Digua Cl`, al igual que ´Zafiro-INIA`, logró producir grano en estas condiciones. Sin embargo, mostró niveles de tolerancia al frío, inferiores al testigo tolerante (PT 12). Se observó que el efecto de las bajas temperaturas se relaciona con un retraso en la fenología de la planta, que se mantuvo verde en comparación con la planta control que presentó coloración más amarillenta, debido al proceso de madurez más avanzado (Foto 5). Además, se observó que las panículas de la planta control tuvieron tendencia a caer por el peso de los granos, a diferencia de las panículas de la planta tratada con frío que se mantuvieron erectas, debido a la menor presencia de granos y su menor peso.

Foto 5. Efecto del tratamiento de bajas temperaturas en la nueva Variedad ´Digua Cl`. (A) planta completa y (B) vista en detalle de las panículas.

Foto 6. Esterilidad apical, fenómeno fue observado con mayor intensidad en una línea experimental ZCl-RC4-1. Primer reporte de esterilidad apical en Chile.

Es importante destacar que, por primera vez en Chile, se observó después del tratamiento la ´esterilidad apical`, fenómeno que ocurre debido al aborto pre floral (Foto 6). Esto fue observado tanto en ´Zafiro-INIA` como en la variedad ´Digua Cl`, con un 20 % de flores afectadas por panícula, aproximadamente, en algunas temporadas. Durante los ensayos de tolerancia al frío en la etapa reproductiva, bajo condiciones controladas, se pudo observar niveles de esterilidad floral superiores a 80 %, así como un 20 % de panículas con esterilidad apical por planta, presentándose, al menos, 6 % de espiguillas estériles con morfología anormal. Por otro lado, en las evaluaciones de diferentes fechas de siembra en condiciones de campo, entre la última semana de septiembre y la última semana de noviembre, la esterilidad floral de ´Digua Cl` fluctuó entre 17 % y 24 %, muy similar a lo observado en ´Zafiro-INIA`. Además, el rendimiento en grano de ´Digua Cl` fue similar a ´Zafiro-INIA` en las diferentes fechas de siembra evaluadas (7,3 - 10,2 t ha^{-1}).

Los resultados permiten indicar que ´Digua CI` posee una tolerancia al frío similar a ´Zafiro-INIA`, razón por la cual se espera un buen establecimiento en condiciones de campo de la nueva variedad de arroz. Para ello, se sugiere considerar las fechas de siembra y manejo de lámina de agua de manera similar a ´Zafiro-INIA`.

B) Un herbicida específico Clearfield®: Eurolightning®

Los herbicidas de la familia de las imidazolinonas de BASF son herbicidas de amplio espectro para uso en post-emergencia temprana y que pueden usarse exclusivamente en cultivos que tengan el gen de resistencia a estos productos. En este caso, ´Digua CI` es la primera variedad de arroz chilena de grano largo ancho, *japonica* templada, con tecnología CLEARFIELD® y selectiva a herbicidas de la familia de las imidazolinonas.

Las evaluaciones realizadas indicaron que es importante complementar la aplicación del herbicida Eurolightning® con otros herbicidas para un buen control de las malezas. Durante la temporada 2017-2018 se evaluó una solución productiva para aplicaciones del agricultor en las localidades de Linares, Parral y San Carlos. Se utilizó Eurolightning® (2 (L ha^{-1}) + Facet (1,6 L ha^{-1}) + Dash (0,4 L ha^{-1}) (Foto 7 a) y Eurolightning® (2, 5 (L ha^{-1}) + Facet (1,6 L ha^{-1}) + Dash (0,4 L ha^{-1}) (Foto 7 b). No hubo diferencia entre las dosis de 2,0 y 2,5 (L ha^{-1}) de Eurolightning®. En San Carlos no hubo necesidad de aplicar MCPA para controlar segunda generación de malezas.

Debido a que el sistema de control de malezas es una actividad dinámica y depende de la temporada, localidad e incluso del potrero, se ha continuado con la evaluación de diferentes soluciones productivas, manteniendo como eje central el herbicida Eurolightning®.

Foto 7. Variedad ´Digua CI` evaluada con: A) Eurolightning® (2,5 (L ha^{-1}) + Facet (1,6 L ha^{-1}) + Dash (0,4 L ha^{-1}) y B) testigo sin aplicación. Temporada 2017-2018.

Para ello, durante la temporada 2018-2019 y 2019-2020 se incorporaron nuevos herbicidas a la solución productiva CLEARFIELD® que comprende el uso de Eurolightning® + Facet® y el complemento con Basagran, y/o MCPA, ya sea en mezcla o en secuencia, para buscar las mejores alternativas al control de malezas. Adicionalmente, se continuan realizando evaluaciones de estos tratamientos con distintos equipos de aplicación que utilizan los productores (bomba de espalda, tractor con barra o dron), para ajustar el paquete tecnológico a utilizar.

Recomendaciones del control de malezas en arroz en el sistema Clearfield®*

Momento y consideraciones de aplicación de Eurolightning® + Facet®

- Aplicar en post-emergencia temprana del arroz, desde 2 hojas o 20 d después de la siembra de arroz pregerminado.
- La dosis recomendada es: Eurolightning® de 2,0 a 2,5 L ha^{-1} + Facet®25 SC de 1,6 a 2,0 L ha^{-1}. Se recomienda consultar con un asistente técnico antes de la aplicación.
- El hualcacho y las otras malezas del cultivo deben tener 2 a 3 hojas de desarrollo como máximo.
- Las malezas deben estar expuestas al momento de la aplicación.
- Bajo condiciones de alta presión o emergencias tardías de pasto cabezón y/o hualtata, pudiese ser necesario Basagrán + MCPA.

*Esta recomendación se continúa evaluando para adaptarla a las condiciones específicas de los agricultores del area arrocera.

Manejo del agua para la aplicación del herbicida

- Bajar el agua en los cuadros 1 a 2 d antes de la aplicación de Eurolightning® + Facet, dejando las malezas expuestas. Aplicar la mezcla sobre suelo barroso.
- Después de transcurridos 2 d desde la aplicación, se debe rellenar los cuadros y mantenerlos con un nivel adecuado de agua durante el desarrollo del cultivo.
- Mantener pretiles, canales y zanjas, libre de malezas.

Manejo del arroz Clearfield® voluntario (plantas voluntarias)

- Controle las malezas durante el cultivo de arroz.
- Evite el movimiento de semillas entre campo y campo.
- Minimice las pérdidas de semillas de arroz durante la cosecha. Ponga especial atención en la calibración correcta de la máquina cosechadora.
- Una vez cosechado el arroz Clearfield®, limpie muy bien la máquina cosechadora en el potrero Clearfield®, para evitar traslado de semillas Clearfield® a campos con sistema convencional de arroz.
- Cubra las cargas de las semillas durante el transporte para evitar dispersarlas.

Recomendación general del herbicida

Respete los períodos mínimos de espera entre la aplicación de Eurolightning® y la siembra de los siguientes cultivos convencionales: trigo: 1 mes; achicoria: 5 meses; avena: 6 meses; lupino: 8 meses; raps y otras crucíferas de siembra directa y de trasplante: 10 meses; y 12 meses para maíz y remolacha.

C) Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en arroz Clearfield®

Semilla certificada

- Compre semilla certificada todos los años a las empresas autorizadas.
- Verifique que el saco de la semilla tenga la marca Clearfield® y el sufijo CL.

Rotación de cultivos y recomendaciones después de Clearfield

- Un año arroz Clearfield® / año siguiente con arroz convencional. Se recomienda que a la temporada siguiente del arroz Clearfield®, se siembre una variedad de arroz convencional ´Zafiro-INIA` o ´Cuarzo-INIA`.
- No guarde semilla para el año siguiente. Entregue toda la producción al molino.
- En el cultivo siguiente a arroz Clearfield, no utilice herbicidas del tipo ALS.
- Controle las malezas durante la producción de arroz convencional. Ello permite rotar con herbicidas de diferente modo de acción como, por ejemplo, Molirox® y Heat®, además de disminuir la formación de resistencia que generan las malezas con el uso repetido de los herbicidas.

  Recuerde que éste es un sistema de control integrado para el manejo de resistencia de malezas, por lo que se permite la rotación de diferentes ingredientes activos con los sistemas tradicionales de control de malezas en variedades no Clearfield®, lo que incide en el aumento de los rendimientos.
- Para mantener la eficacia de Eurolightning® no use el sistema Clearfield® en el mismo potrero antes de 1 temporada.

Época de siembra

La fecha de siembra tiene gran importancia en el cultivo del arroz en Chile, debido, principalmente, a las bajas temperaturas nocturnas presentes en la zona arrocera (Donoso y Paredes, 2015). Por este motivo, todas las variedades de arroz liberadas al mercado nacional deben ser sometidas a evaluaciones de diferentes fechas de siembra, para conocer su desempeño en diversos escenarios de siembra. Por ello, durante las temporadas 2015-2016, 2016-2017 y 2017-2018 se realizaron ensayos en campos de la zona arrocera, con el fin de determinar la fecha óptima de siembra de la variedad ´Digua Cl`, utilizando como testigo la variedad comercial ´Zafiro-INIA`.

A pesar de que ambas variedades presentaron un comportamiento agronómico similar, la fecha de siembra recomendada para la variedad Clearfield es entre el 1 y 20 de octubre. Posterior a estas fechas, el agricultor puede perder, al menos, un 30 % de rendimiento de su producción.

La siembra oportuna permite que la planta de arroz complete la etapa de floración cuando se alcancen los máximos niveles de temperatura y radiación solar. En cambio, fechas de siembras tardías (noviembre), retrasan la floración hasta febrero, mes en el que tanto las temperaturas como la radiación solar, comienzan a disminuir, lo cual afecta el rendimiento.

Zona de siembra

Debido a la estabilidad del rendimiento de la nueva variedad de arroz ´Digua Cl` en los diferentes ambientes estudiados, se concluye que esta variedad puede ser sembrada en cualquier localidad de la zona arrocera de Chile.

Fertilización

Los resultados obtenidos indican que la variedad de arroz ´Digua Cl` reaccionó al nitrógeno, fósforo y a la aplicación foliar de zinc en floración o de zinc + boro en macolla (Foto 8). Si bien no hubo reacción al potasio y al encalado, se sugiere aplicar una dosis de mantención de potasio (reposición de la extracción del grano de arroz para evitar la pérdida de fertilidad del suelo) de 25 a 30 kg ha^{-1} de K_2O (40 a 50 kg ha^{-1} de muriato de potasio) y la aplicación de cal en dosis de 2.000 kg ha^{-1} de $CaCO_3$ cuando el pH del suelo sea inferior a 5,5, para lo cual se requiere contar con análisis de suelo realizado, al menos, cada 4 años.

Foto 8. Ensayo de fertilización en variedad de arroz ´Digua Cl` con aplicación foliar de zinc y boro. Parral, Temporada 2016-2017.

Recomendación general

Basado en el análisis de suelo, la recomendación de fertilización para la variedad de arroz ´Digua Cl` es la siguiente:

A la siembra

- Aplicar 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 (60 a 70 kg ha^{-1} de superfosfato triple o fosfato diamónico).
- Aplicar 30 kg ha^{-1} de K_2O (50 kg ha^{-1} de muriato de potasio).
- Aplicar 50 kg ha^{-1} de N (110 kg ha^{-1} de urea cuando se haya usado superfosfato triple, u 80 kg ha^{-1} de urea cuando se haya usado fosfato diamónico).

Estas dosis son equivalentes al uso de 200 kg ha^{-1} de una mezcla N: P_2O_5: K_2O = 25:15:15 formulada con urea + fosfato diamónico + muriato de potasio.

A inicio de macolla:

- Aplicar 50 a 55 kg ha^{-1} de N (110 a 120 kg ha^{-1} de urea).

En plena macolla:

- Aplicación foliar de zinc + boro en dosis de 1 L ha^{-1} de producto comercial de cada elemento (ejemplo; 1 L de Defender Zinc + 1 L de Defender Boro, o 1 L de Nutri Zinc + 1 L de Nutri Boro).

Inicio de panícula:

- Aplicar 55 a 60 kg ha^{-1} de N (120 a 130 kg ha^{-1} de urea).

Consideraciones finales

La estrategia de trabajo utilizada permitió cumplir con el objetivo planteado: obtener una variedad de arroz clearfield (´Digua Cl`) de grano largo ancho, similar a ´Zafiro-INIA` (variedad adaptada y ampliamente aceptada por los consumidores, industria y agricultores) y que poseyera el gen de resistencia a los herbicidas de la familia de las imidazolinonas. Sin embargo, esta estrategia se continua evaluando y ajustando a las condiciones específicas de la zona arrocera del país.

En este sentido, se registraron los siguientes hitos:

Hito 1. 2011. Se inicia el desarrollo de las líneas experimentales clearfield.

Hito 2. 2014. Se inicia la evaluación de las líneas experimentales clearfield en el campo, por tres temporadas y en tres localidades.

Hito 3. 2018. Se selecciona la línea RC4 Cl-15 y se registra bajo el nombre comercial ´Digua Cl`, como un reconocimiento al Embalse Digua, por su aporte al desarrollo del cultivo del arroz en el país.

Esta nueva tecnología en el cultivo de arroz se desarrolló gracias al trabajo de una alianza pública-privada, financiada, en dos etapas por FONDEF, y ejecutada y cofinanciada por el INIA, las empresas Tucapel S.A., Carozzi S.A. y BASF Chile S.A.

Esperamos que este un nuevo ´Sistema de Producción de Arroz Clearfield` pueda ser un aporte para mejorar la competitividad y sustentabilidad del sector arrocero nacional.

Referencias

Alvarado, R. 2007. Arroz, Manejo tecnológico, Chillán, Chile. Instituto de investigaciones agropecuarias. Boletín INIA N° 162, 180 p.

Alvarado, R., Pedreros, A. 1991. Presencia de arroz rojo en Chile. Agric. Téc. (Chile) 51:374-377.

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., Sperotto, R., Cargnelutti, D., et al. 2013. Avoiding damage and achieving cold tolerance in rice plants. Food Energy Sec. 2:96-119.

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., Paredes, M. 2015. Efecto de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz. p. 18-21. En M. Paredes, V. Becerra (eds.). Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura. Chillán, Chile.

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.

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.

Farrell, T.C., Williams, R.L., Fukai, S. 2001. The cost of low temperature to the NSW rice industry. Proc. 10th Aust. Agron. Conf. 1:1300–1430.

Hatfield, J., Prueger, J. 2015 Temperature extremes: Effect on plant growth and development. Weather Climate Extremes. 10: 4-10.

IRRI. 1983. Final report of the Seventh International Rice Cold Tolerance Nursey. P.34. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.

Lee, M.H. 2001. Low temperature tolerance in rice: the Korean experience. p. 109–117. In Fukai S. and Basnayake, J. (eds.) Increased lowland rice production in the Mekong Region. Proceedings of an international workshop, Vientiane, Laos, 30 October to 2 November 2000. Australian Center for International Agricultural Research, Canberra, Australia.

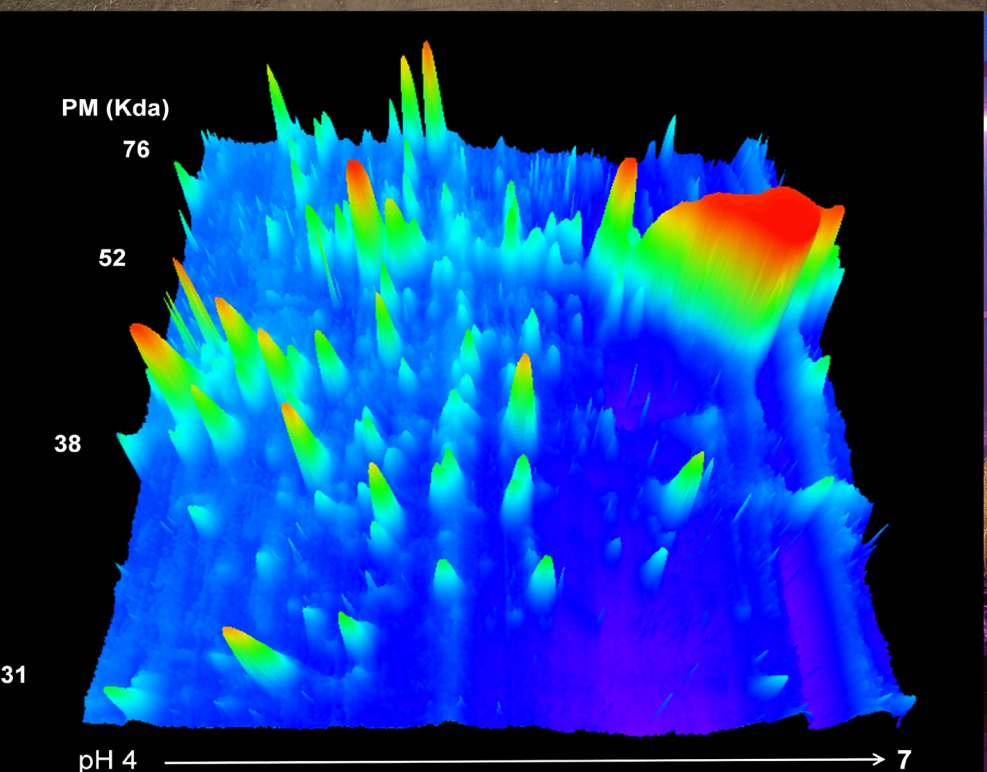
INN. 1999. NCh 1375.Of88. Arroz con cáscara (arroz Paddy) – Métodos de ensayo y análisis. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

INN. 2003a. NCh 1359.Of2003. Arroz pulido – terminología, clasificación y requisitos generales. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

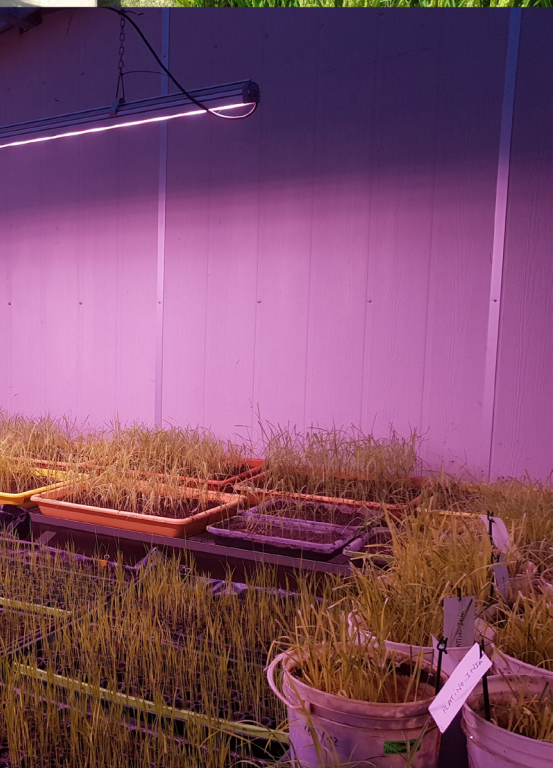
INN. 2003b. NCh 2033.Of2003. Arroz con cáscara (arroz Paddy) – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

Pedreros, A., Ormeño, J., Alvarado, R. 1992. Control de malezas de hoja ancha en arroz. Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile) 52:36-39.

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.


PM (Kda)
76
52
38
31
pH 4
7

Epssilon
NETWORKS



SECCIÓN X. DESAFÍOS PARA EL CULTIVO DEL ARROZ EN CHILE PARA LA PRÓXIMA DÉCADA

Desafíos para el cultivo del arroz en Chile para la próxima década

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

El incremento en la productividad del arroz requerirá de un esfuerzo importante en investigación, desarrollo e innovación, para alcanzar nuevas formas de producción y productos con mayor valor agregado que permitan abastecer la demanda de los consumidores. En este sentido, el enfoque tradicional de I+D, tendiente a buscar una mayor producción y calidad, ya no es suficiente, por lo que resulta necesario incluir, también, las nuevas demandas surgidas desde los productores y consumidores. Este tipo de demanda está relacionada con aspectos tales como nutrición, inocuidad, respeto por el medio ambiente, transparencia de los mercados y una justa retribución de los beneficios a todos los actores de la cadena productiva. Además de esta nueva problemática, se deben enfrentar, al mismo tiempo, los desafíos del cambio climático y el mercado del trabajo.

Los principales temas a abordar en la próxima década son:

1. Sustentabilidad

La sustentabilidad es un tema que ha adquirido gran importancia, en la última década. Así, las empresas arroceras han definido políticas de sustentabilidad integrales que incluyen a todos sus procesos productivos, los que, influyen en los sistemas productivos de los agricultores. Afortunadamente, estas nuevas políticas están siendo difundidas periódicamente a los agricultores, para coordinar y tomar las medidas que correspondan. Por otro lado, el Ministerio de Agricultura diseñó una política de sustentabilidad, que incluye 10 principios y criterios que definen una agricultura sustentable, de la cual se derivan la aplicación de buenas prácticas al sector, cuya implementación se promueve a través de la Comisión Nacional del Arroz. Los principios incluidos en el protocolo de sustentabilidad son: monitoreo y uso del recurso hídrico, respeto de los derechos humanos, condiciones de trabajo y protección social, manejo de residuos, manejo y aplicación de agroquímicos, gestión de la inocuidad y trazabilidad, relación con las comunidades locales, gestión de la biodiversidad y servicios ecosistémicos, gestión energética, manejo y conservación de suelo, y aseguramiento de la sanidad y bienestar animal.

Desde el punto de vista productivo, se requiere aumentar y/o mantener el potencial del rendimiento, produciendo variedades resistentes a los estreses bióticos y abióticos, en un escenario de cambio climático. Para ello, resulta necesario utilizar nuevos métodos de mejoramiento y tecnologías disponibles, para acelerar la ganancia genética y producir un arroz que se adapte a los nuevos cambios climáticos y posea una alta calidad que satisfaga las necesidades de la población y con respeto al medio ambiente.

Adaptación al cambio climático. Chile es un país social, económica y ambientalmente vulnerable al cambio climático, ya que cumple con siete de las nueve características de vulnerabilidad, mientras que el sector silvoagropecuario se encuentra entre los sectores económicos más sensibles. Los estudios de prospectiva climática realizados en el país, han concluido que la mayor parte de las Regiones agrícolas (Atacama a Los Lagos) sufrirán una desertificación, como consecuencia de una menor pluviometría. Específicamente, se informa que habrá una reducción de las precipitaciones cercana al 30 %, a finales de siglo, en la zona central entre los paralelos 30 ° y 42 ° Sur, esto es, entre las regiones de Coquimbo a Los Lagos. Aunque, la lluvia no es un elemento clave en el suministro de agua al cultivo del arroz, el cambio climático también

afectará las reservas de nieve, lo que sí puede tener un gran impacto en el suministro de agua para el cultivo. Otro factor involucrado en el cambio climático, es el de las altas temperaturas, hasta ahora no consideradas como un factor limitante en la producción de arroz en el país. A pesar de esta situación, las bajas temperaturas continuarán siendo en factor limitante para el cultivo.

Gases efecto invernadero (GEI). En el año 2017 Chile ratificó los compromisos del Acuerdo de París, primer tratado vinculante mundial respecto del clima. Nuestro país comprometió realizar contribuciones tendientes a mitigar los impactos del cambio climático. Éstas apuntaban a reducir en 30 % las emisiones del CO_2 por unidad de PIB al 2030, respecto a 2007. Se estima que Chile genera, a 2020, el 0,26 % de las emisiones de GEI del mundo. De ellas, el 21,4 % proviene del sector silvoagropecuario y su proyección es al alza si no se generan medidas de adaptación y mitigación. En este aspecto, es necesario investigar y promover la adopción de tecnologías que aumenten la productividad y, a su vez, secuestren carbono, mejoren las condiciones de los suelos y reduzcan la intensidad de las emisiones.

En el año 2012 se iniciaron trabajos tendientes a adaptar y validar un protocolo de evaluación de la emisión de metano y óxido nitroso en el cultivo de arroz, e iniciar con las primeras evaluaciones bajo diferentes condiciones del cultivo, como fertilización y manejo de rastrojo. Esos trabajos permitieron obtener los primeros datos empíricos de emisión de metano y óxido nitroso en el arroz bajo condiciones inundadas. Adicionalmente, en 2020 se trabajaba en varios sistemas de manejo de agua, información que vendrá a complementar la ya obtenida. En los próximos estudios, se abordarán otros sistemas de producción y se escalará las evaluaciones en condiciones de agricultor y en las diferentes zonas productivas, para tener información que represente lo que ocurre en la zona arrocera del país. Esta información permitirá tomar las medidas de mitigación correspondientes, definir sistemas de producción sustentables y cumplir con los compromisos nacionales e internacionales que ayuden a reducir el calentamiento global.

Inocuidad. Uno de los aspectos importantes de la inocuidad de los alimentos es la ausencia de elementos que puedan dañar la salud y poseer un buen sistema de trazabilidad para poder identificar el origen de posibles problemas. En el año 2016, se empezó un trabajo tendiente a prospectar los niveles de arsénico presentes en el agua, suelo y grano en la zona arrocera del país e identificar algunas prácticas agronómicas que permitieran reducir su presencia en el grano. Los resultados obtenidos indican que los niveles de arsénico encontrados en el suelo, agua y grano del arroz producido en el país, están bajo las normas nacionales e internacionales, por lo cual es inocuo para la salud. Esta información ha permitido que, en las próximas temporadas, se evalúen sistemas de producción tendientes a reducir, aún más, los bajos niveles detectados. Esta situación, unida a la ausencia de aplicaciones de fungicidas e insecticidas hacen al arroz un producto inocuo y limpio, lo cual debe ser difundido y destacado en su proceso de comercialización.

2. Incremento de la productividad

El aumento de la productividad del cultivo del arroz debe considerar los siguientes aspectos.

Relación clima-productividad. La producción chilena de arroz está ubicada en la zona más austral del mundo, por lo cual el clima juega un rol muy importante. Desde 2012, ha habido un avance significativo en la obtención de información climática en la zona arrocera, con la instalación de cuatro estaciones meteorológicas, producto de la colaboración público-privada, en diferentes localidades, lo cual ha permitido colectar, procesar y analizar los principales parámetros climáticos, para evaluar su relación con la producción del arroz en el país. En este sentido, es necesario instalar nuevas estaciones meteorológicas en el sector norte de Parral y en localidades aledañas, para tener un conocimiento climático más acabado de la zona, considerando que ahí se concentra el 80 % de la producción de este cereal.

Actualmente, existen escasos estudios que permitan comprender cómo influirá el clima en la producción y calidad del arroz producido en la zona. La ubicación austral de la producción arrocera, los cambios en las temperaturas y en la disponibilidad de agua que se continuarán agudizando en el futuro, hacen imprescindible reforzar el trabajo tendiente a determinar el efecto de los parámetros climáticos y de las prácticas agronómicas sobre el crecimiento y desarrollo de la planta, y sus aspectos productivos y de calidad. Las temperaturas y la disponibilidad del agua continuarán siendo factores que afectarán la producción y calidad del arroz.

En la actualidad, las bajas temperaturas afectan negativamente la germinación, estado de plántula e inicio de la formación de las estructuras reproductivas (polen y/o óvulo), además de afectar los estados fenológicos del cultivo. Por otro lado, debido al aumento de las temperaturas producto del cambio climático, es necesario iniciar estudios para evaluar sus efectos, especialmente durante la fase reproductiva de la planta. Se debe tener en cuenta que el diferencial de temperatura entre la mínima y la máxima es alto y puede llegar, en algunos casos, a 20 °C en un contexto de alta radiación, escasa o nulas precipitaciones, baja humedad relativa del aire y un largo fotoperiodo. Esta información permitirá profundizar en la zonificación en el área productiva y el modelamiento fenológico de variedades, para optimizar los recursos genéticos (variedades) y las condiciones agroecológicas de la zona.

Rotaciones. La producción de arroz se desarrolla en un sistema de producción intensiva y poco diversa, donde impera el monocultivo del arroz o una rotación corta de arroz-pradera natural-arroz, con la incorporación de algún otro cultivo en vez de pradera natural. Esta situación fragiliza el sistema de producción en el mediano y largo plazo, ya que contribuye a disminuir la fertilidad del suelo y a aumentar la infestación de malezas, por lo cual resulta necesario, estudiar la posibilidad de incorporar nuevos cultivos y/o praderas en la rotación, para no seguir agudizando esta situación. Este tema, unido a la creciente escasez hídrica, necesita ser abordado próximamente, tomando en cuenta las posibles alternativas de producción para la zona, como una manera de contribuir a mejorar la sustentabilidad del cultivo.

Sistema de siembra. El principal sistema de producción de arroz es el inundado, que utiliza semilla pregerminada. Durante la última década, este sistema de producción ha sufrido un mejoramiento importante en algunos aspectos, como la nivelación de los suelos, que ha impactado positivamente en diferentes prácticas agronómicas, manejo del agua, control de malezas, reducción del número de pretiles, manejo del agua y el uso de mecanización. Sin embargo, todavía existen algunos problemas a mejorar, como el uso de mayor mecanización en algunas prácticas agronómicas.

El otro sistema de producción utilizado es la siembra directa, que se ha ido incorporado lentamente, y que presenta varias ventajas, como el menor uso de agua en los primeros estados de desarrollo del cultivo y la mayor mecanización de ciertas labores agronómicas, en relación al sistema inundado. No obstante, para que este sistema se masifique, se necesita una mayor disponibilidad de maquinarias y conocer el efecto de algunos aspectos agronómicos como la densidad de plantas, fertilización, control de malezas, y manejo de agua, entre otras, en las diferentes localidades arroceras de la zona. Dados los avances en los sistemas de siembra, es posible iniciar trabajos relacionados con la agricultura de precisión, como mapeo sitio específico del suelo, monitoreo de rendimientos, aplicaciones variables de insumos, entre otros.

Variedades. El arroz producido en el país es del tipo *japonica* templado, que se caracteriza por poseer una altura de planta de entre 90 y 100 cm, resistente a la tendedura, buena respuesta a los fertilizantes y un período de siembra a cosecha de 155 a 160 d. Desde el punto de vista de calidad, las variedades poseen un grano largo ancho, bajo contenido de panza blanca, un contenido de amilosa y un tiempo de gelatinización intermedio, por lo cual no son pegajosos después de la cocción. Las variedades comerciales actuales son ´Zafiro-INIA`, ´Cuarzo-INIA` y ´Digua Cl`. Esta última es la primera variedad Clearfield, que posee características similares a ´Zafiro-INIA`.

Además de estas variedades, existen otras destinadas a ocupar nichos específicos, como ´Ámbar-INIA`, variedad de grano pequeño y glutinoso, y la variedad ´Platino INIA`, de grano medio, translúcido y con un bajo porcentaje de panza blanca, apta para sushi y paellas, entre otras preparaciones. La creación de nuevas variedades es una necesidad permanente para mantener la competitividad de los sistemas productivos.

Alimentación y nutrición humana. El arroz es un producto rico en carbohidratos, mediano en proteínas, grasas, vitaminas del complejo B, como niacina, riboflavina y tiamina, macro nutrientes tales como calcio, magnesio y fósforo, micronutrientes como cobre, hierro, manganeso y zinc, y otros componentes ubicados en diferentes partes del grano, como en el pericarpio, germen y endospermo, todos con actividad biológica. Los componentes bioactivos presentes en el arroz han mostrado protección contra algunas enfermedades y un impacto positivo en el sistema inmune del cuerpo. En el caso de los arroces de colores, que han adquirido un mayor interés y estimulado su uso en nutracéuticos y han participado en la industria de los alimentos, poseen una alta actividad biológica y un positivo impacto en la salud humana. Esta área de investigación es muy activa en la búsqueda del rol de sus diferentes componentes en diferentes enfermedades y en el mayor valor agregado en su uso y que se puede explorar en el país.

Manejo de agua. En el año 2010 Chile empezó a ser afectado por una aguda y sostenida sequía, sin precedentes en los registros históricos, esperándose que episodios similares tiendan a ser más frecuentes en el futuro. El recurso agua es y continuará siendo un factor limitante para el desarrollo del cultivo en los sistemas de producción actualmente en uso, es decir, sistema inundado y siembra directa. Durante 2014 se inició la evaluación de variedades ante un uso restringido de agua, los resultados indicaron que, es importante desarrollar nuevas variedades, más eficientes en el uso del agua, especialmente durante el período reproductivo, donde se utilizan los mayores volúmenes. Otra estrategia es producir variedades más precoces que puedan escapar de los meses de menor disponibilidad de agua. Una estrategia complementaria es el estudio y la implementación de nuevos sistemas de manejo de agua y estructuras de riego más eficientes que permitan un mejor aprovechamiento del recurso, dentro y fuera del predio.

Control de malezas. Las malezas son uno de los factores agronómicos más importantes que limitan la producción eficiente del arroz. Evaluaciones realizadas en la zona han determinado pérdidas de rendimientos promedios de un 30 %, debido a un control deficiente de malezas. En este sentido, se han registrado pérdidas de rendimiento entre 26 % y 49 %, producto de la presencia de bajas poblaciones de *Echinochloa* spp., y de un 15 % a 45 % por un mal control de ciperáceas. Dada la complejidad de este problema, se debe adoptar un sistema de control integrado que incluya prácticas culturales, como la preparación de suelos, uso de semilla certificada, aplicaciones de fertilizantes y manejo de agua, entre otros. Se debe continuar el esfuerzo de reemplazar el uso de equipos manuales por equipos mecanizados de aplicación de productos químicos, que contribuyan a tomar mejores decisiones en relación a la época y dosis de aplicación de productos. Es preciso realizar estudios de ecología de las malezas, presencia de malezas resistentes a herbicidas y utilizar estrategias de control químico que reduzcan la posibilidad de que las malezas continúen desarrollando resistencia a los herbicidas utilizados.

Otro aspecto a considerar es el monitoreo del manejo de residuos y de los envases que quedan después de las aplicaciones. En el caso de los envases, se podría promover un plan de reciclaje de envases dejados en los diferentes procesos agrícolas.

Fertilización. En la actualidad, la aplicación de nutrientes involucra, principalmente, el nitrógeno, fósforo y potasio. En este aspecto, es importante continuar promoviendo el uso del análisis de suelos que apoya la aplicación de una dosis adecuada y particular a la condición de cada agricultor. Por otro lado, es importante monitorear la respuesta de los diferentes nutrientes asociados a las variedades comerciales y sistemas de cultivo (inundado o siembra directa), como también evaluar la respuesta al encalado y micronutrientes que podrían contribuir a aumentar la producción.

Enfermedades y plagas. El cultivo del arroz en Chile no presenta una infestación por plagas y enfermedades. Sin embargo, dada las nuevas condiciones impuestas por el cambio climático, hay que monitorear constantemente cualquier posible aparición de síntomas de enfermedades y plagas. En este sentido, es muy importante revisar los requisitos sanitarios para la importación de arroz paddy y, en lo posible, establecer una estación de cuarentena preventiva, para evaluar el germoplasma introducido al país con fines de investigación.

Mecanización. A pesar de los avances logrados, es importante promover y difundir la presencia de una mayor mecanización del cultivo convencional, e introducir nuevas tecnologías como la agricultura de precisión. Se debe considerar que un alto porcentaje de los agricultores manejan pequeñas y medianas superficies de siembra, por lo cual el uso de la maquinaria debería ser compatible con esta situación. De ahí la necesidad de promocionar, a través de ferias, giras tecnológicas u otros medios, maquinaria que cumpla con estas características. Por otro lado, es importante formar capacidades humanas que sean capaces de hacer un uso eficiente de ellas y realizar la mantención de estos recursos.

Cambios en el mercado del trabajo. La estrechez de la oferta de mano de obra en el sector arrocero es un cambio estructural que se acelera cada vez con más fuerza y que se manifiesta, al menos, de dos formas: a) como una menor disposición de los trabajadores a desempeñarse en algunas actividades, producto de los mayores incentivos y expectativas que ofrecen otros sectores agrícolas y/o no agrícolas, y b) como un déficit de personal calificado en nuevas tecnologías, producto del desarrollo de la agricultura. Una manera de abordar este problema podría ser el establecimiento de programas de capacitación certificado para los trabajadores, en nuevos procesos, tecnologías y sistemas de gestión de los recursos que les permitan mejorar la productividad y sus expectativas salariales.

3. Transferencia y difusión de la tecnología

Uno de los principales productos a transferir son las variedades generadas y el uso de semilla certificada. En este sentido, es importante reconocer la rápida adopción de las variedades ´Zafiro-INIA` y ´Cuarzo-INIA` por parte de los agricultores, en reemplazo de las variedades ´Diamante-INIA` y ´Brillante-INIA`. Un caso similar es el uso de ´Platino-INIA` que reemplazó, rápidamente, a la variedad ´Oro`, dentro de un nicho específico. ´Platino-INIA` es la primera variedad en ser identificada en los envases de comercialización de la industria, como variedad generada por INIA, lo que marca un hito en la relación público-privada. En este sentido, el futuro desafío es transferir y adoptar la tecnología involucrada en el Sistema de Producción de Arroz Clearfield, que incluye a la variedad ´Digua Cl`, resistente a los herbicidas de la familia de las imidazolinonas. Este nuevo sistema permite contar con un sistema alternativo y complementario al sistema actual de producción nacional.

Otro aspecto importante a considerar, y que está íntimamente relacionado con las variedades, es el uso de semilla certificada. Se estima que un 50 % de los agricultores usa semilla certificada, lo que representa un aumento importante en la última década, incremento que se debe a la actividad de los programas de fomento de INIA, INDAP y empresas molineras. A pesar de ello, se debe continuar fomentando el uso de este insumo, indispensable para lograr mayores rendimientos, mejor calidad y rentabilidad del cultivo del arroz. En este sentido, es necesario adaptar un sistema de evaluación del impacto logrado por la adopción de la tecnología.

Adicionalmente, es importante considerar la difusión de las tecnologías y prácticas agronómicas relacionadas con la producción. Los estudios experimentales y de validación de la tecnología disponible permiten estimar que el potencial de rendimiento de las variedades en uso, es superior a las 12 t ha^{-1}. Si se considera que el rendimiento promedio de los agricultores que usan la tecnología recomendada oscila entre 8 y 9 t ha^{-1} y que el promedio nacional está en las 6,5 t ha^{-1}, se puede concluir que existe un desafío a abordar para reducir estas brechas, uti-

lizando la tecnología disponible. Una manera de enfrentar esta situación considera: a) realizar un diagnóstico que permita conocer las causas del escaso uso de la tecnología por parte de algún sector de los agricultores arroceros; b) una vez conocidas las causas, reforzar la extensión y difusión de tecnologías específicas en estos sectores, posiblemente con programas especiales, para poder mejorar la productividad del sector. Hoy día, las empresas molineras poseen la información suficiente de sus usuarios, en cuanto a volumen y calidad del producto, que podría servir como base para permitir la focalización y, de esta forma, lograr la generación de un plan de acción priorizado. Este trabajo debe ser abordado en forma conjunta entre las autoridades políticas y tecnológicas, incluidas las instituciones de investigación, de desarrollo agrícola, de financiamiento, transferencia de tecnología, empresas molineras y de venta de insumos.

Otro aspecto a considerar en las actividades de difusión, es la capacitación en nuevas tecnologías, por ejemplo, manejo de riesgo agroclimático, manejo eficiente de los recursos hídricos, mecanización, teledetección satelital, sistemas de información geográfica y el acceso general al uso de la tecnológica digital disponible que puede ayudar a obtener la información técnica-económica, inserción en el mercado, normas ambientales necesarias para mejorar la eficiencia productiva. Es posible que un alto porcentaje de los agricultores arroceros no tengan los conocimientos básicos para utilizar un computador y acceder a la información disponible, no sólo tecnológica sino también financiera. Paralelamente, es importante considerar, también, programas tendientes a entregar información sobre gestión productiva y conceptos básicos de contabilidad, que ayuden a la planificación de flujos de caja y a tener un mayor control de los costos de producción.

4. Organización

El sector arrocero nacional tiene una buena organización que le permite presentar y discutir los principales problemas que afectan al sector en La Comisión Nacional del Arroz, entidad que coordina el Ministerio de Agricultura. Esta Comisión posee dos subcomisiones que consideran los procesos de innovación y comercialización, donde están representados todos los actores de la cadena productiva. Esta organización es la más adecuada para realizar un plan estratégico que permita priorizar, desarrollar y contribuir a financiar una agenda de innovación para el sector. En este sentido, existen ejemplos de diferentes tipos de organizaciones en Colombia, Uruguay, Australia y U.S.A., entre otros países, donde los agricultores, la industria, las instituciones de investigación y de extensión trabajan coordinadamente, tras objetivos comunes.

Finalmente, consideramos que a pesar de haber logrado reunir y sistematizar la información disponible durante los 100 años del cultivo del arroz en Chile. Sin embargo, creemos que es posible continuar complementando la información presentada en estos dos tomos. Por este motivo, invitamos a quienes posean información adicional, la puedan compartir para realizar nuevas ediciones, que nos permita actualizar el conocimiento de este cultivo en nuestro país.

BIENVENIDOS
INIA
50
Campo Experimental de Arroz - INIA

INIA-Biotecnología. 2014-2015.