



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS



MANEJO Y USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO INTRAPREDIAL PARA EL SUR DE CHILE

Conceptos y consideraciones básicas en métodos y
programación de riego para optimizar el recurso hídrico

ISSN: 0717-4829

Editor: Rafael López-Olivari

Boletín INIA N° 340

MANEJO Y USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO INTRAPREDIAL PARA EL SUR DE CHILE

Conceptos y consideraciones básicas en
métodos y programación de riego para
optimizar el recurso hídrico.

**AUTOR:
RAFAEL LÓPEZ-OLIVARI**

TEMUCO, DICIEMBRE 2016

Directora Regional: Ivette Seguel Benítez, Bióloga M.Sc.

Editor: Rafael López-Olivari., Ing. Agrónomo, Mg., Dr.

Comité Editor:

Fernando Ortega K., Ing. Agrónomo Ph.D

Jorge Díaz S., Ing. Agrónomo Dr.

Gabriela Chahín, Ing. Agrónomo

Jaime Mejías B., Ing. Agrónomo Ph.D

Rafael López-Olivari, Ing. Agrónomo Ph.D

Lilian Avendaño Fuentes, Magíster en Com. Estratégica y Marketing Corporativo

Gabriel Sellés, Ing. Agrónomo Ph.D

Alejandro Antúnez B., Ing. Agrónomo Ph.D

Boletín INIA N° 340

ISSN: 0717-4829

López-Olivari, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el Sur de Chile: Conceptos y consideraciones básicas en métodos y programación de riego para optimizar el recurso hídrico. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional Carillanca. Km 10 camino Cajón Vilcun, (56-45) 2297100. 156 pp.

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin permiso del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura.

Diseño y diagramación: Ramón Navarrete.

Impresión: Imprenta América

Cantidad Ejemplares: 1000

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES	5
1.1. Introducción	5
1.2. Aspectos generales	6
1.2.1. Clima	6
1.2.2. Suelo	11
CAPÍTULO 2. BALANCE HÍDRICO GENERAL	15
2.1. Concepto	15
2.2. Región de La Araucanía	15
2.3. Región de Los Lagos	17
CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE RIEGO	19
3.1. Criterios para elegir un método de riego	19
3.2. Riego gravitacional	21
3.2.1. Situación actual del sur de Chile	22
3.2.2. Riego por inundación	23
3.2.2.1. Tendido	23
3.2.2.2. Consideraciones del riego por inundación	24
3.2.3. Riego por surco	24
3.2.3.1. Rectos	24
3.2.3.2. Contorno	25
3.2.3.3. Parámetros de diseño riego por surco	26
3.2.4. Mejoras del riego gravitacional	33
3.3. Riego presurizado	37
3.3.1. Situación actual del sur de Chile	38
3.3.2. De baja frecuencia	39
3.3.2.1. Riego por aspersión estacionario	40
3.3.2.2. Riego por aspersión mecanizados	49
3.3.3. De alta frecuencia	70
3.3.3.1. Goteros o líneas de goteo	70
3.3.3.2. Microaspersión	77
3.3.3.3. Componentes del riego de alta frecuencia	84
3.3.3.4. Consideraciones prácticas del riego presurizado	85
3.3.3.5. Evaluación de la uniformidad	87

CAPÍTULO 4. MANEJO Y PROGRAMACIÓN DE RIEGO _____ 91

4.1. Problemas asociados a un mal manejo del agua de riego _____	91
4.2. Información básica para programar el riego _____	92
4.2.1. Información de suelo _____	92
4.2.1.1. Propiedades físicas de suelo _____	92
4.2.1.2. Dinámica del agua de riego en el suelo _____	102
4.2.1.2.1. Infiltración del agua en el suelo _____	102
4.2.1.2.2. Disponibilidad de agua en el suelo _____	106
4.2.2. Información de planta y clima _____	112
4.2.2.1. Consumo de agua por las plantas _____	113
4.2.2.1.1. Evapotranspiración (ET) _____	113
4.2.2.1.2. Factores que afectan el consumo de agua por las plantas _____	116
4.2.2.1.3. Evapotranspiración de referencia (ET _o) _____	118
4.2.2.1.4. Coeficientes de cultivo (K _c) _____	120
4.2.2.1.5. Evapotranspiración del cultivo, real o actual (ET _c o ET _a) _____	123
4.2.2.1.6. Precipitación efectiva (P _{ef}) _____	124
4.2.2.1.7. Períodos críticos de un cultivo _____	125
4.3. Programación de riego (PR) _____	127
4.3.1. Interrogantes básicas en la práctica del riego _____	128
4.3.2. Frecuencia (Fr) y tiempo (Tr) de riego _____	130
4.3.3. Programación de riego en un sistema por surco _____	134
4.3.4. Programación de riego en un sistema por goteo _____	137
4.3.5. Programación de riego en un sistema por aspersión _____	140
4.3.6. Selección y programación de riego en un sistema por carrete _____	143
4.3.7. Selección y programación de riego en un sistema de pivote central _____	147

LITERATURA CITADA _____ 155

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de gases invernadero a nivel mundial ha incrementado debido al uso indiscriminado de combustibles fósiles (IPCC, 2014), afectando principalmente la capa de ozono del planeta. Lo anterior, permite el ingreso con mayor fuerza de las diferentes radiaciones, provocando un aumento de las temperaturas, lo que afecta directamente el ciclo del agua y del carbono. Esto, induce cambios en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones y la disponibilidad del agua de riego, produciendo constantes sequías o períodos de escasez hídrica principalmente en la zona centro-norte y centro-sur de Chile (MOP, 2013). Así, por ejemplo, desde la Región de La Araucanía al sur se han empezado a visualizar disminuciones en la disponibilidad del recurso hídrico entre 20 y 30% (Banco Mundial, 2011), afectando directamente los períodos de crecimiento y desarrollo de los frutales, cultivos, hortalizas, praderas y cereales. Esto conlleva a la necesidad de tomar medidas preventivas para proponer soluciones y optimizar el uso del recurso hídrico.

La zona sur de Chile (en este escrito, referido a las regiones de La Araucanía y Los Lagos) se ha experimentado un explosivo incremento en la superficie plantada, principalmente de frutales mayores y menores, y de algunos cultivos como papa, lo que es muy promisorio para las zonas indicadas. El problema que se puede presentar, es la disminución del recurso hídrico y su disponibilidad durante los períodos de crecimiento y desarrollo de estos cultivos y frutales, ya que desde la Región de La Araucanía a Los Lagos existen pocas obras mayores de acumulación de agua para riego.

El manejo del agua para riego debe responder a cuatro preguntas básicas: ¿Por qué regar?, ¿Cómo regar?, ¿Cuándo regar? y ¿Cuánto regar?. Para aclarar adecuadamente estas preguntas, es necesario conocer, entender y aplicar conceptos básicos de suelo, de planta, de clima y de agua de riego y sus interacciones. Una apropiada respuesta a dichas preguntas permitirá lograr u obtener buenos resultados al final de los procesos productivos. Además, ayudará a una buena gestión hídrica, pudiendo, por ejemplo, cuantificar la cantidad de agua que entra y sale del sistema (balances hídricos). Para realizar apropiadamente dichos manejos, es necesario cuantificar los requerimientos hídricos que necesitan los frutales, cultivos, hortalizas, praderas y cereales, considerando características edafoclimáticas y etapas fenológicas.

Por otro lado, desde la Región de La Araucanía hacia el sur, se desarrolla principalmente agricultura de secano, pero de acuerdo a los antecedentes descritos anteriormente es necesario capacitar a los agricultores sobre conceptos y consideraciones básicas en el manejo del agua, de sistemas de riego y de las interacciones entre suelo, agua, planta y clima.

El presente boletín está orientado a productores, profesionales y técnicos del sector agropecuario, además de personas que deseen incursionar en el área de recursos hídricos intraprediales. En este documento se describen los principales conceptos básicos para entender la dinámica del agua de riego en la interacción suelo-planta-clima y qué factores la gobiernan. Así como también, se plantean consideraciones que se deben tener en cuenta para elegir o adecuar un sistema de riego según las condiciones en las que se encuentre el productor o agricultor. Finalmente, se presentan los factores claves para entender y aplicar herramientas de manejo del agua de riego intrapredial de manera simple y práctica.

El capítulo 1 está orientado a entregar información básica, relevante y actualizada de clima y suelo, pues de ellos depende, en gran medida, el manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial. Para realizar un manejo hídrico sustentable, es necesario que exista una estrecha interacción entre los componentes suelo, planta y clima, a fin de optimizar el manejo del agua de riego en frutales, cultivos, hortalizas, praderas y cereales.

1.2. ASPECTOS GENERALES.

1.2.1. Clima.

El clima se refiere al estado o condición de la atmósfera que afecta un lugar o área en un período de tiempo determinado. Esta condición es compleja y dinámica, ya que depende de otros factores como latitud, altitud, rotación y traslación de la tierra, relieve, corrientes marinas, distancia del lugar desde el mar, entre otras. Así, **Macroclima** es una condición climática que se presenta en grandes superficies, mientras que, **Microclima** se refiere a una condición climática de una área más pequeña, como localidad, predio agrícola, o incluso una planta u hoja, donde el clima de ese lugar o ambiente presentan características diferentes a la zona climática en que se encuentra inserto. Para la agricultura existe el concepto de **Distrito Agroclimático**, es decir áreas insertas bajo condiciones agroclimáticas homogéneas caracterizadas por variables térmicas e hídricas relevantes para la agricultura.

El clima predominante entre la Región de La Araucanía y Los Lagos es templado lluvioso con influencia mediterránea. La característica principal es que las lluvias están presentes todo el año, concentrándose durante otoño-invierno y disminuyendo en primavera-verano en mayor o menor magnitud, dependiendo de la zona. Sin embargo, durante las

últimas décadas, el clima de la zona sur de Chile presenta fluctuaciones importantes, particularmente en la intensidad y frecuencia de precipitaciones. Así, en el sector de Carillanca, Región de La Araucanía, entre los años 1964 y 2016, las precipitaciones históricas promedio anuales y por temporada agrícola (septiembre-abril) fueron de 1.343 y 537 mm, respectivamente. Este sector ha enfrentado dos grandes disminuciones de las precipitaciones anuales, comparado al promedio histórico, que fueron durante los años 1996, 1998 y 2013, alcanzando valores de 907, 620 y 914 mm, respectivamente. Sin embargo, a partir del año 2007 hasta la fecha, Carillanca ha estado en su mayoría bajo el valor promedio histórico llegando a un valor promedio de 914 mm en el año 2013 (Gráfico 1a). Esto significa que la localidad lleva casi 7 años seguidos con disminuciones de las precipitaciones anuales. Además, en la localidad de Carillanca se han observado fuertes disminuciones del agua lluvia histórica durante el período de crecimiento y desarrollo de los principales cultivos y frutales que se producen en la Región de La Araucanía. Así, por ejemplo durante las temporadas 1998/99, 2007/08, 2008/09 y 2014/15 con valores de 275, 324, 266 y 267 mm, respectivamente (Gráfico 1b).

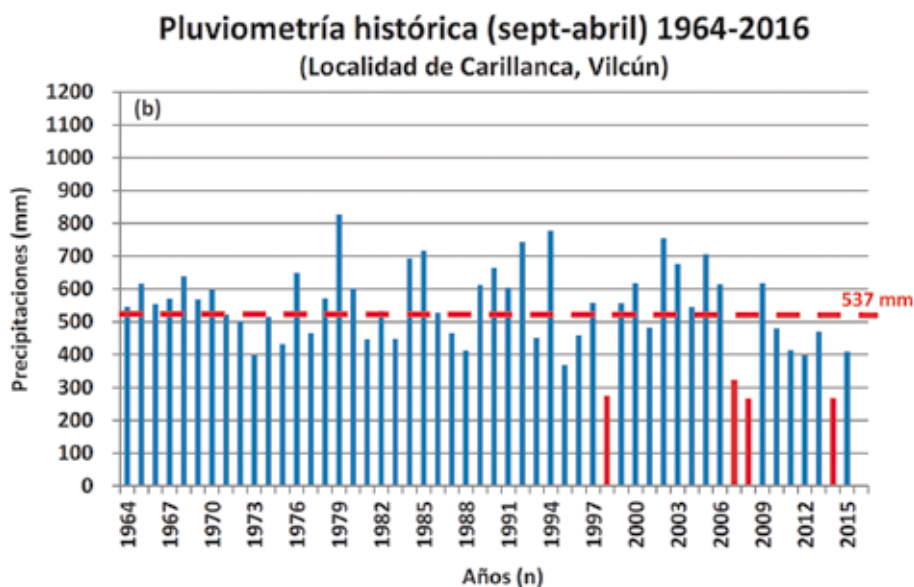
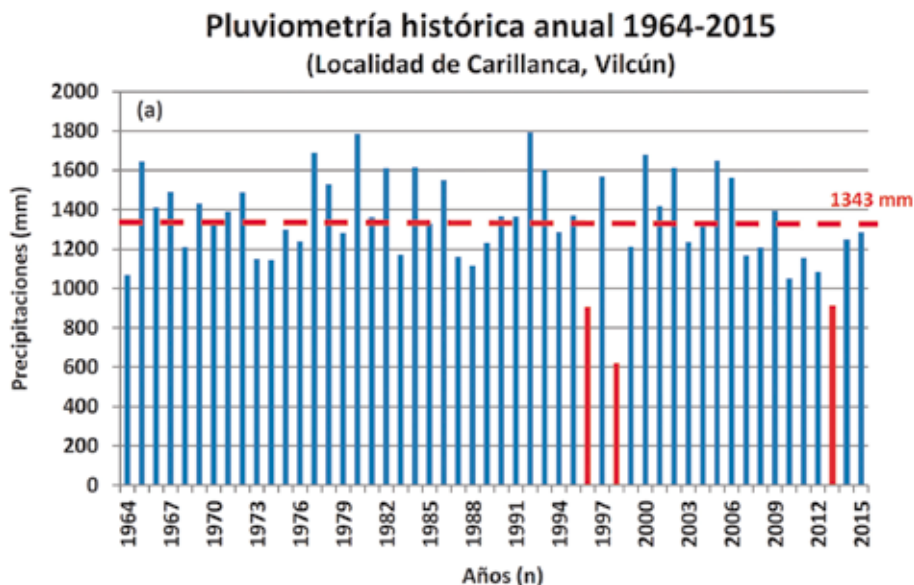


Gráfico 1. Precipitaciones históricas promedio anual (a) y por temporada agrícola entre septiembre-abril (b) para la localidad de Carillanca, Región de La Araucanía. Líneas punteadas de color rojo muestran el promedio histórico. Año 1964 en el gráfico equivale a la temporada agrícola 1964/65 y así sucesivamente.

Por otro lado, en la localidad de Remehue, Región de Los Lagos, entre los años 1977 y 2013, la precipitación histórica promedio fue de 1249 mm y por temporada agrícola fue de 535 mm. Sin embargo, esta área también ha enfrentado fuertes disminuciones en la precipitación anual comparada al promedio histórico. Éstas fueron en los años 1988, 1989, 1998, 2007, 2010 y 2013 con valores de 785, 898, 893, 890, 979 y 969 mm, respectivamente. Igual que en el sector de Carillanca, Remehue a partir del año 2007 a la fecha ha estado por debajo del promedio histórico de la precipitación anual llegando incluso a un valor de 969 mm en el año 2013 (Gráfico 2). También se han observado importantes disminuciones del agua de lluvia por temporada agrícola, alcanzando valores de 346, 312 y 299 mm para la temporada 1988/89, 1998/99 y 2008/09, respectivamente.

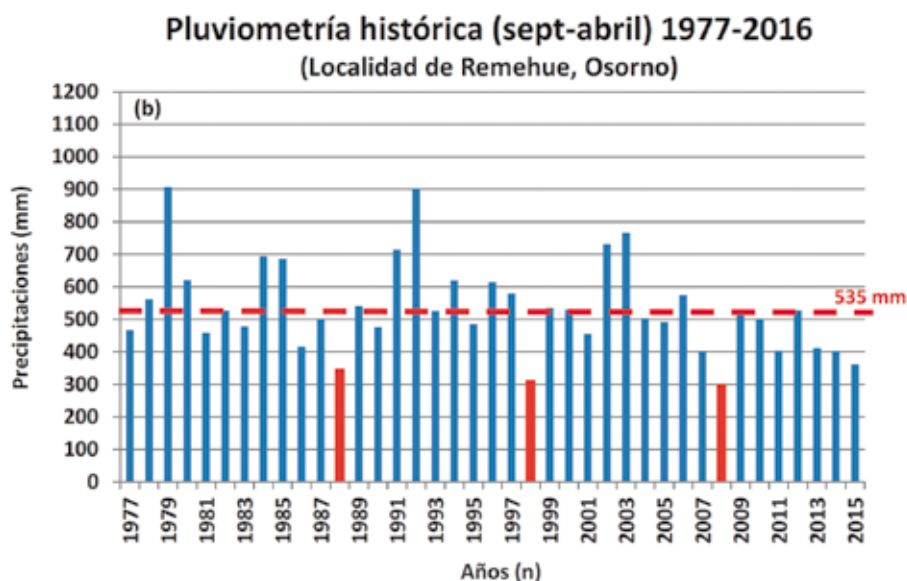
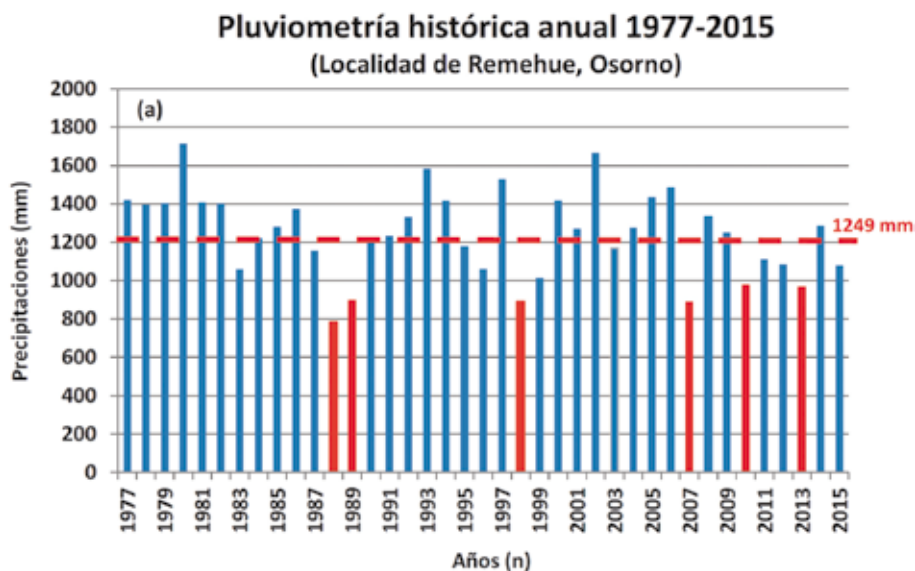


Gráfico 2. Precipitaciones históricas promedio anual (a) y por temporada agrícola entre septiembre-abril (b) para la localidad de Remehue, Región de Los Lagos. Líneas punteadas de color rojo muestran el promedio histórico. Año 1977 en el gráfico equivale a la temporada 1977/78 y así sucesivamente.

La disminución de lluvias desde septiembre a abril coincide, en su mayoría, con los principales períodos de crecimiento y desarrollo de frutales, cultivos, hortalizas, praderas y cereales. Lo anterior, hace imprescindible la incorporación del riego dentro de los manejos agronómicos que hace varios años atrás no estaba considerado como una necesidad en la zona sur de Chile. Por ende, si no se realizan estrategias de manejo del agua de riego en esos períodos se podría ver afectada la producción final de algunos cultivos, con una baja considerable en los retornos económicos de las diferentes especies cultivadas desde la Región de La Araucanía a Los Lagos.

1.2.2. Suelo

El suelo juega un rol importante en el manejo del agua de riego, ya que es el macetero natural que tienen las raíces para absorber el agua de riego o lluvia efectiva. La cantidad de agua que puede retener un suelo depende de sus propiedades físicas, dada por la textura, estructura, contenido de materia orgánica (MO), profundidad, entre otras. La textura se encuentra representada por el porcentaje de arena, limo y arcilla. Un suelo presenta una buena textura cuando los porcentajes de estos elementos (arena, limo y arcilla) en su conjunto le entregan a la planta un soporte para un buen desarrollo radicular y un adecuado nivel nutricional. Los suelos del sur de Chile presentan altos porcentajes de materia orgánica (MO), lo cual nutren de manera natural los suelos. La MO tiene la propiedad de retener altos contenidos de humedad (como una esponja), lo cual incide en la planta, directa e indirectamente, manteniendo las raíces bien aireadas y en crecimiento activo. Así, la MO es uno de los factores importantes a considerar al momento de calcular las propiedades físico-hídricas de un suelo pensando en un manejo del agua de riego adecuado (más detalles en Capítulo 4). Todos estos elementos ayudan a determinar la humedad aprovechable total de un suelo y el agua fácilmente aprovechable por las raíces de una planta.

Los suelos de la Región de La Araucanía provienen, mayoritariamente, de suelos derivados de cenizas volcánicas (39% de suelos trumaos y ñadis; Andisol), suelos provenientes de depósitos aluviales más desarrollados (32% de suelos de Tundra; Inceptisol) y suelos profundos con un horizonte superficial negro y alto contenido de materia orgánica (15% de suelos Mollisol). Los suelos de una zona se agrupan en series de suelo los cuales presentan características similares en sus horizontes. En la Figura 1 se encuentran los principales tipos de suelo de la Región de La Araucanía, los cuales se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Series y asociaciones de suelo más importantes, simbología, humedad aprovechable (% peso/peso) y agua disponible total (ADT; mm/m) referenciales de los suelos de La Araucanía.

Series de suelo y principales asociaciones	Textura de suelo	Simbología Figura 1	Rangos de humedad Aprovechable (%) [*]	ADT promedio (mm/m)*
Aguas fría	Franco limoso	agf	23,8 - 13,6	140,1
Barros Arana	Franco limoso	bar	32,1 - 27,3	212,9
Caburga	Franco limoso	cab	24,2 - 19,6	117,5
Chufquén	Franco limoso	cfq	11,6 - 7,9	116,1
Cholchol	Franco arcillo limoso	cho	15,0 - 6,3	150,5
Cunco	Franco limoso	cnc	22,3 - 12,5	131,9
Collipulli	Franco arcillo limoso	cpl	16,3 - 10,1	87,2
Correltúe	Franco limoso	cte	22,2 - 10,5	113,5
Curacautín	Franco limoso	ctn	18,5 - 16,5	142,3
San Esteban	Franco arcillo arenoso	et	13,0 - 7,6	119,5
Freire	Franco limoso	fre	20,7 - 15,5	98,1
Guadaba	Arcilloso	ga	16,0 - 10,0	136,1
Gorbea	Franco limoso	gor	19,5 - 11,4	130,6
Lagos	-	lag	-	-
Lastarria	Franco limoso	las	15,1 - 12,4	102,7
Los Copihues	Franco arcillo limoso	lch	13,2 - 7,9	130,2
Lumaco	Franco arcillo limoso	lmo	13,1 - 3,8	137,7
Loncoche	Franco limoso	loc	36,5 - 12,4	163,5
Los Nevados	Franco arenoso grueso	lon	9,7 - 3,4	70,1
Los Prados	Franco limoso	lop	22,2 - 12,4	154,2
Los Lagos	Franco arcillo limoso	llo	25,8 - 9,8	128,0
Malihue	Franco limoso	mal	30,7 - 13,4	174,0
Metrenco	Franco arcillo limoso	met	8,4 - 6,6	78,2
Mininco	Franco arcilloso	min	9,9 - 6,5	78,8
Nahuelbuta	Arcilloso	na	9,3 - 6,0	-
Negrete	Franco arcillo limoso	ne	19,0 - 15,0	208,5
Nueva Imperial	Franco limoso	npl	8,6 - 6,0	75,8
No registrado	-	nr	-	-
Pitrufquén	Franco limoso	pit	29,6 - 28,8	204,3
Pemehue	Franco limoso	pme	25,9 - 13,4	149,0
Perquenco	Franco arcillo limoso	pqc	16,2 - 10,5	135,4
Puerto Saavedra	Franco	psa	15,8 - 6,2	66,2
Quintrilpe	Franco limoso	qtp	17,2 - 13,3	134,8
Santa Bárbara	Franco limoso	sba	33,0 - 16,9	162,4
Los Sauces	Franco arcilloso	scs	14,0 - 9,2	148,5
Santa Sofía	Franco arenoso	ssf	7,6 - 5,0	80,5
Temuco	Franco limoso	tem	27,1 - 16,9	189,1
Tijeral	Franco	tij	20,6 - 12,2	158,9
Vegas	-	v	-	-
Victoria	Franco arenoso fino	vct	30,3 - 22,2	196,6
Vilcún	Franco limoso	vlc	31,0 - 8,7	180,0

^{*}; diferencia entre W_{cc} y W_{PMP} : humedad gravimétrica (%p/p) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), respectivamente. ^{*}; se asume sin piedras en el perfil de suelo y una fracción de suelo mojado (FSM) igual a 1. Adaptado de CIREN, 2002.

Por su parte, los suelos mayoritarios que se encuentran en las regiones de Los Ríos y Los Lagos son los derivados de cenizas volcánicas (74% de suelos trumaos y ñadis: Andisol), suelos provenientes de depósitos aluviales más desarrollados (16% de suelos de Tundra; Inceptisol) y suelos con un horizonte B bien expresado por un aumento de la arcilla comparado al horizonte A (8% de suelos pobres en nutrientes: Ultisol). En el Cuadro 2 se presentan las series de suelo más importantes de estas regiones del sur junto con los rangos de humedad aprovechable y alturas de agua promedio.

Cuadro 2. Series y asociaciones de suelo más importantes, simbología, humedad aprovechable (% peso/peso) y agua disponible total (ADT mm/m) referenciales de los suelos de Los Ríos y Los Lagos.

Series de suelo y principales asociaciones	Textura de suelo	Simbología	Rangos de humedad aprovechable (%) [*]	ADT promedio (mm/m)*
Alerce	Franco	alc	62,9 – 46,6	290,2
Corte alto	Franco arcillo limoso	ato	33,0 – 13,0	187,8
Correltúe	Franco limoso	cte	22,2 – 10,5	113,5
Crucero	Franco limoso	cru	31,7 – 17,0	163,6
Cudico	Franco arcillo arenoso	cud	5,6 – 2,3	45,6
Chan Chan	Franco limoso	chh	33,4 – 19,7	174,4
Frutillar	Franco	fru	67,2 – 56,5	359,4
Huiño Huiño	Franco limoso	hhn	18,9 – 14,0	198,4
Huiti	Franco limoso	hui	19,9 – 11,9	129,4
Itropulli	Franco limoso	itr	18,9 – 14,0	98,7
Lanco	Franco limoso	lan	41,8 – 38,2	234,0
Liquiñe	Franco arenoso fino	lqe	24,7 – 8,9	127,2
Los Lagos	Franco arcillo limoso	llo	25,8 – 9,8	128,0
Llastuco	Franco limoso	llt	22,3 – 11,3	117,4
Mauilín	Franco arenoso	mln	12,6 – 3,3	44,2
Nva. Braunau	Franco arenoso	nbu	4,8 – 3,2	28,8
Osorno	Franco limoso	osr	112,0 – 15,2	391,4
Paillaco	Franco limoso	pai	24,5 – 12,1	114,9
Pelchuquín	Franco limoso	pqu	30,5 – 26,1	215,0
Piedras negras	Franco limoso	png	29,8 – 17,2	138,9
Pto. Fonk	Franco	pfo	108,5 – 18,8	276,1
Pto. Montt	Franco	pmt	132,9 – 28,9	405,2
Pto. Octay	Franco limoso	pxo	91,0 – 56,3	278,2
Ralún	Franco arenoso	ral	16,7 – 8,8	160,6
Río bueno	Franco arcillo limoso	rib	26,6 – 16,2	144,7
San José	Franco limoso	saj	46,2 – 16,1	185,9
Valdivia	Franco limoso	val	23,0 – 3,0	101,8
Los nevados	Franco arenoso grueso	lnv	9,7 – 3,4	70,1
Piuchen de Chiloé	Franco arenoso	phn	18,5 – 9,3	86,3

^{*}; diferencia entre W_{cc} y W_{PMP} : humedad gravimétrica (%p/p) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), respectivamente. ^{*}; se asume sin piedras en el perfil de suelo y una fracción de suelo mojado (FSM) igual a 1. Valores para suelos con profundidad desde 0 a 100 cm. Adaptado de CIREN, 2003.

CAPÍTULO 2

BALANCE HÍDRICO GENERAL

2.1. Concepto

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). Esto se puede describir de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P+I=E+Pe+\Delta S+ET$$

Donde, P son las precipitaciones (mm día⁻¹); I es el aporte de riego (mm día⁻¹); E es el escurrimiento superficial (mm día⁻¹); Pe es la percolación profunda (mm día⁻¹); ΔS es el cambio en el almacenaje agua del suelo (mm día⁻¹) y ET es la evapotranspiración (mm día⁻¹).

2.2. Región de La Araucanía

Así, en la localidad de Carillanca, Región de La Araucanía, se puede observar que la demanda de la atmósfera por agua (evapotranspiración de referencia (ET_o) y evaporación de bandeja (E_b)), fue casi siempre mayor que el aporte hecho por la precipitación (P_p) sobre todo entre los años 1985/90, 1995/00 y 2005/14, mientras que durante 1991/95 y 2001/05 se observó un mayor aporte de agua por la precipitación para las temporadas agrícolas entre septiembre y abril (Gráfico 3). El balance hídrico histórico promedio de todas las temporadas agrícolas (1984/85 – 2015/16) se muestran en la Gráfico 4. En ella se observa que existe un déficit de aporte de agua de lluvia entre los meses de noviembre a marzo, alcanzando una mayor diferencia en el mes de enero (-134 mm). Dicha información es muy relevante, ya que en este período ocurren los principales eventos de crecimiento y desarrollo de los cultivos, frutales, hortalizas, praderas y cereales, lo cual requiere un aporte de agua que debe ser suplida de manera artificial a través del riego.

Balance hídrico histórico (1977 - 2016) (Localidad de Carillanca, Vilcún)

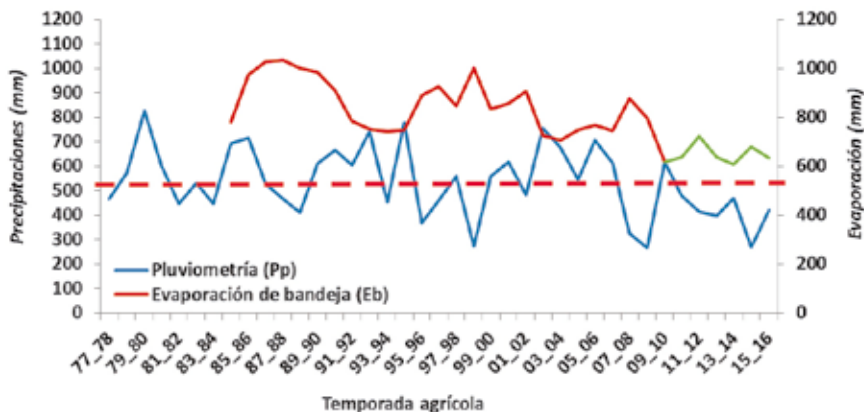


Gráfico 3. Balance hídrico de referencia histórico para la localidad de Carillanca, Región de La Araucanía. Línea punteada de color rojo muestra el promedio histórico (537 mm). Línea verde corresponde a la evapotranspiración de referencia (ET0).

Balance hídrico Carillanca (Temporadas agrícolas desde 1984 hasta 2016)

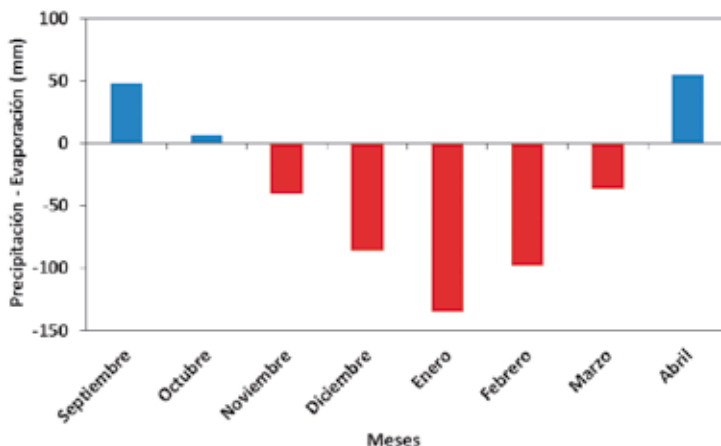


Gráfico 4. Balance hídrico histórico mensual para las temporadas agrícolas comprendidas entre 1984/85 y 2015/16 observadas en la localidad de Carillanca, Región de La Araucanía.

2.3. Región de Los Lagos

Por otro lado, en la localidad de Remehue, Región de Los Lagos, se puede observar que la demanda de la atmósfera por agua (ETo y Eb) fue casi siempre mayor que el aporte hecho por la precipitación (Pp), sobre todo entre los años 1980/90, 1995/01 y 2005/14. Sin embargo, durante las temporadas 1991/95 y 2002/05 se observó un mayor aporte de agua debido a las precipitaciones registradas en las temporadas agrícolas entre septiembre a abril (Gráfico 5). El balance hídrico promedio histórico mensual de todas las temporadas agrícolas (1977/78-2015/16) se muestran en la Gráfico 6. En ella se observa, que históricamente existe un déficit de aporte de agua de lluvia entre los meses de noviembre a marzo, alcanzando una mayor diferencia en el mes de enero (-110 mm). Al comparar ambas localidades, se puede interpretar que existen similares tendencias históricas en cuanto a la distribución y frecuencias de las precipitaciones y meses de déficit dentro de la temporada agrícola, cambiando sólo las magnitudes de los valores.

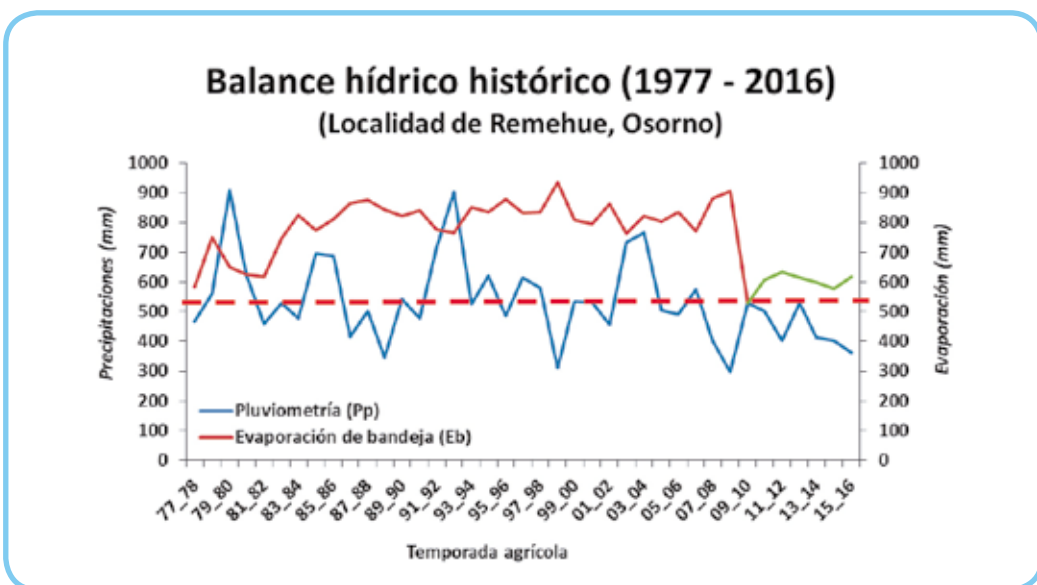


Gráfico 5. Balance hídrico de referencia histórico para la localidad de Remehue, Región de Los Lagos. Línea punteada de color rojo muestra el promedio histórico (535 mm). Línea verde corresponde a la evapotranspiración de referencia (ETo).

Balance hídrico Remehue (Temporadas agrícolas desde 1977 hasta 2016)

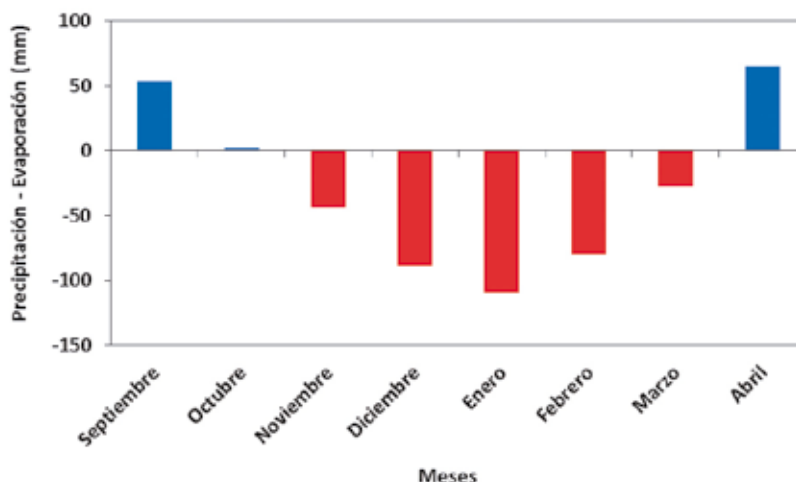


Gráfico 6. Balance hídrico histórico mensual para las temporadas agrícolas comprendidas entre 1977/78 y 2015/16 observadas en la localidad de Remehue, Región de Los Lagos.

De acuerdo a los datos de balance hídrico mostrados arriba, en el sur de Chile se debe aplicar agua de manera artificial con mayor o menor frecuencia aproximadamente desde noviembre hasta marzo. Esta información es muy relevante, ya que en estos períodos ocurren los principales eventos de crecimiento y desarrollo de los cultivos, frutales, hortalizas, praderas y cereales, donde se requiere un aporte de agua que debe ser suplida de manera artificial a través del riego. La información general aquí presentada sirve de base y de guía para entender la importancia que tiene el clima (principalmente la pluviometría) y el tipo de suelo como una herramienta práctica sobre los manejos y aplicaciones de agua de riego que se pueden realizar durante la temporada agrícola (septiembre-abril). Así, las frecuencias y tiempos de riego dependen en gran medida de los aportes naturales de agua a los predios y del tipo de suelo que tenga el campo. Estos temas se profundizarán en el Capítulo 3 y 4.

CAPÍTULO 3.

MÉTODOS DE RIEGO

El éxito o fracaso de una agricultura con riego depende en gran medida del método de riego a utilizar, el cual debe permitir que el cultivo alcance su máximo rendimiento sin deteriorar el suelo (erosión, lixiviación de nutrientes, concentraciones de sales, entre otros). No existe un método de riego ideal o uno mejor que otro que se pueda emplear en forma eficiente en todas las condiciones de suelo y cultivo. Por ello, hay que tener presente que los métodos de riego se diseñan para determinadas condiciones de operación, considerando factores técnicos y económicos.

Además, en este capítulo se entregan conceptos básicos y prácticos, en cuanto a la optimización del recurso hídrico y la eficiencia de los métodos de riego, enfocados a cualquier tipo de cultivo de la zona sur de Chile. También, está orientado, principalmente, a conocer algunos criterios básicos que se deben considerar al momento de elegir un sistema de riego. Por otra parte, se quiere dar a conocer la descripción y algunas consideraciones de los métodos de riego gravitacionales (surco y tendido), presurizados de baja frecuencia (aspersión) y alta frecuencia (goteo, cinta y microaspersión). Por último, mostrar alternativas de cómo mejorar los sistemas usados en el sur de Chile, con el objetivo de minimizar las pérdidas de agua por distribución y optimizar la entrega de ésta al cultivo.

3.1. Criterios para elegir un método de riego.

Es necesario considerar una serie de criterios y antecedentes para que la inversión en un sistema de riego signifique mejorar las utilidades del productor o agricultor. A continuación se presenta información sobre varios aspectos a tomar en cuenta al momento de seleccionar un método de riego:

a) Tipo de cultivo: en muchos casos el cultivo determina el sistema de riego a usar. Así, por ejemplo en praderas, es necesario el riego por tendido o aspersión (pivotes centrales), debido a las grandes extensiones de terreno que se utilizan. En cultivos u hortalizas sembradas en hileras, el método de riego por surco puede ser utilizado. Sin embargo, existen cultivos que pueden ser regados por aspersión, cinta o goteo como es el caso de la papa. Por otro lado, los frutales en general presentan problemas en sus raíces si se inundan excesivamente con agua de riego, por lo que pueden ser empleados sistemas de riego por surco o presurizados (riego a presión).

b) Topografía (desnivel de terreno): los sistemas gravitacionales se pueden emplear en terrenos planos o levemente ondulados, con el fin de evitar la erosión del suelo producto del agua. En el caso de terrenos con pendientes mayores ($> 2\%$), se recomienda sistemas de riego presurizados, ya que son más eficientes en su aplicación pudiendo plantar o sembrar en suelos clasificados como no aptos para la agricultura por esta limitante.

c) Tipo de suelo: los perfiles del suelo varían en su profundidad, textura, estructura, drenaje, contenido de materia orgánica, entre otros, afectando la capacidad de almacenamiento de agua y velocidad con que el agua infiltra el suelo. En suelos superficiales (poco profundos) y con alta velocidad de infiltración del agua, los sistemas gravitacionales no serán una buena alternativa. Sin embargo, los sistemas presurizados suelen adecuarse muy bien a cualquier tipo de suelo, ya que la entrega del agua se hace de manera regulada sin provocar inundaciones o anegamientos en suelos arcillosos (gredosos) ni mucha infiltración en suelos arenosos.

d) Recurso hídrico: la disponibilidad de agua en el predio es otro criterio muy relevante a considerar. La cantidad de caudal, tiempo de riego y momentos de entrega del agua son aspectos que pueden determinar fuertemente la elección de un método de riego, ya sea gravitacional o presurizado. En un predio con alto caudal y poco tiempo de riego se hace conveniente el uso de riego por surco, a menos que se tenga la posibilidad económica de realizar un tranque acumulador de agua y utilizar un método presurizado.

e) Capital de inversión y costos de operación: en muchos casos es el primer factor limitante para elegir un adecuado método de riego, ya que no todos los agricultores presentan un capital de inversión inicial. Los costos están asociados principalmente a la construcción, desarrollo y operación de obras de riego intrapredial. Para este caso, la Comisión Nacional de Riego (CNR), a través del “Programa de Bonificación por Inversiones de Riego y Drenaje (ley N° 18.450), hace posible el subsidio directo a la inversión privada en proyectos de riego y drenaje tanto para obras comunitarias (obras civiles extra prediales para la conducción y distribución de agua, y para drenaje), como para obras individuales (tecnificación, establecimiento del riego y drenaje al interior del predio).

f) Clima: muchas zonas del sur de Chile presentan un clima ventoso, donde el uso de riego por aspersión es muy restrictivo, produciéndose pérdidas de agua por deriva o evaporación (agua no útil por la planta). Para minimizar este problema, en un sistema de aspersión de cobertura total, se deben utilizar aspersores con bajo ángulo de inclinación ($< 10^\circ$) y un elevador (tubería de soporte del aspersor) a poca altura (menores a 1,2 metros). En el caso de un pivote central, se recomienda que los aspersores no se encuentren muy arriba de la altura final de la planta, para evitar las pérdidas de agua por evaporación ambiental (deriva) y se aplique realmente el agua al cultivo (ejemplo; praderas, maíz, trigo, entre otros). Por otro lado, el sistema de aspersión por carrete es muy utilizado en el sur de Chile. Sin embargo, para evitar excesivas pérdidas por deriva es necesario, en algunos casos, bajar la presión del sistema o disminuir la inclinación del cañón del carrete dependiendo del cultivo que se esté regando.

g) El Agricultor: se requiere incentivar y profundizar aún más las capacitaciones en manejo de la eficiencia en métodos de riego y manejo óptimo del agua de riego dentro del predio. Esto, debido a que no todos los agricultores presentan y utilizan los conceptos básicos de manejo y uso eficiente del recurso hídrico. En este sentido, uno de los principales problemas está asociado al uso de métodos presurizados, en la cual se debe tener un conocimiento mínimo para poder operarlos y diagnosticar de manera oportuna potenciales problemas mecánicos y prácticos en el campo.

3.2. Riego gravitacional.

En el método de riego gravitacional, la gravedad es la fuerza motriz encargada de mover el agua desde un punto más elevado a otro más bajo a favor de la pendiente. Dentro de este sistema existen dos grandes grupos que son: riego por inundación y riego por surco. Los objetivos principales del riego gravitacional es disminuir las pérdidas de agua por escurrimiento y percolación profunda.

Lo anterior, es para mojar sólo la zona efectiva de raíces e incrementar la eficiencia de riego (Figura 2), y por otro lado, mejorar la distribución del agua para favorecer un desarrollo homogéneo del cultivo orientado a aumentar los rendimientos. Nuestro propósito será abordar el riego por inundación y surco, además de las posibles mejoras, debido a que son los más utilizados entre las regiones de La Araucanía y Los Lagos.

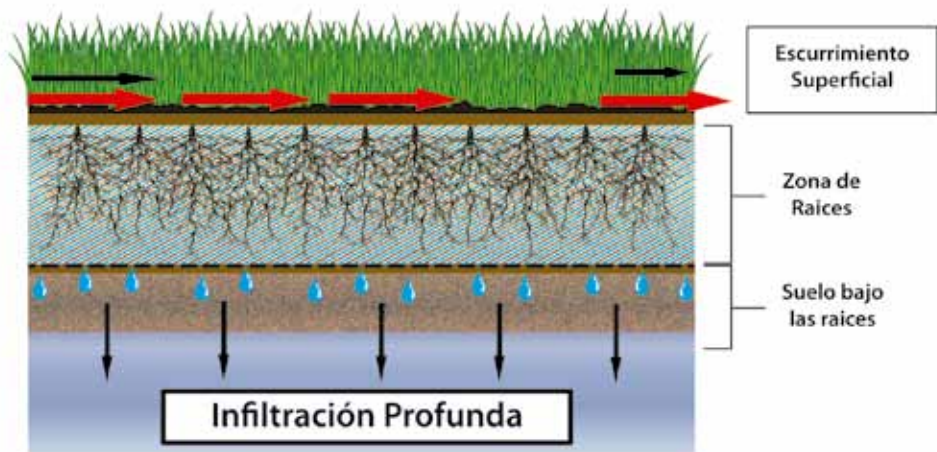


Figura 2. Esquema del movimiento del agua de riego en una pradera mostrando el escurrimiento superficial y percolación o infiltración profunda (López-Olivari, 2014).

3.2.1. Situación actual del sur de Chile

El sistema de riego gravitacional sigue teniendo gran importancia en Chile, representando un 72% de las áreas regadas con cultivos, frutales y sistemas de producción. Del porcentaje indicado, cerca del 41% corresponde a riego superficial por inundación y cerca del 31% a riego por surco. Por otro lado, los diferentes métodos de riego, desde la Región de La Araucanía al sur, han presentado un cambio significativo pasando desde sistemas gravitacionales a sistemas por aspersión y localizado. Si se analiza por región, La Araucanía presenta más del 60% de la superficie regada bajo un sistema de riego por tendido y entre un 5 y 15% bajo riego por surco. Lo anterior, debido al alto predominio de agricultura familiar (cereales, papa, leguminosas, entre otros). Sin embargo, esta situación está cambiando significativamente debido al uso de sistemas de riego presurizados de baja frecuencia, como es el caso de aspersión.

Por otro lado, entre las regiones de Los Ríos y Los Lagos predominan los sistemas de riego mecánico mayores de baja frecuencia, como son el de aspersión y pivote, por presentar zonas en que son importantes los cultivos de forrajes para la industria cárnica y lechera (Gráfico 7).

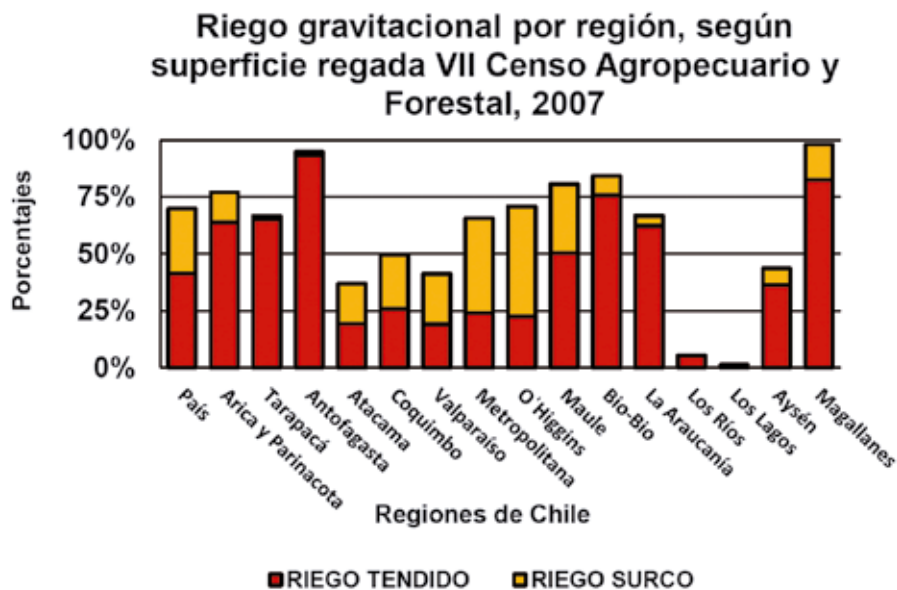


Gráfico 7. Porcentaje de métodos de riego gravitacionales utilizados a nivel país y en las diferentes regiones de Chile.

3.2.2. Riego por inundación

El agua de riego se aplica y distribuye sobre la superficie del suelo, pudiendo cubrir prácticamente toda el área que se pretende regar.

3.2.2.1. Tendido

Es uno de los métodos más antiguos usados en la agricultura regada del país y es el más ineficiente en aplicar el agua a los cultivos, ya que utiliza mucho recurso hídrico y es difícil de controlar en campo. Consiste en dejar escurrir el agua por gravedad desde un canal o acequia construida a lo largo del extremo superior de un campo en pendiente (Figura 3). El método se puede utilizar en terrenos con pendientes de hasta 4% si se trata de praderas.

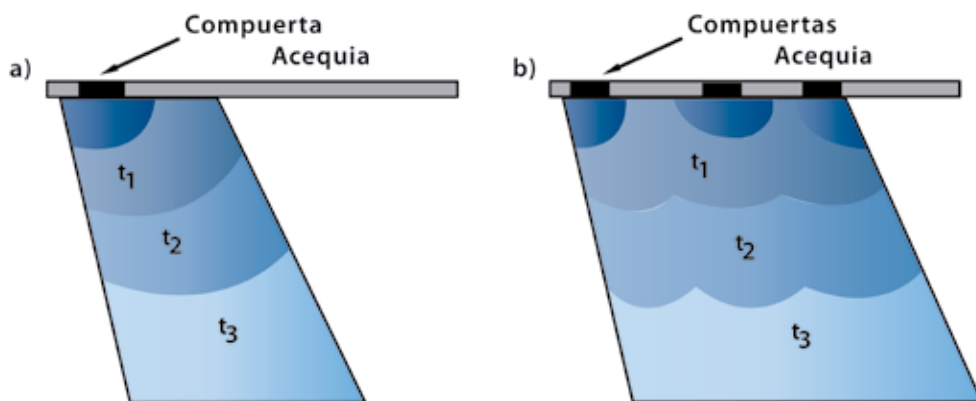


Figura 3. Diagrama simplificado del método por tendido. a) riego en esquina y avance en 3 tiempos (t) y b) riego simultáneo (López-Olivari, 2014).

Las ventajas del sistema de riego por tendido es que permite regar cultivos de cobertura completa como los cereales y praderas. Requiere de poca inversión inicial, limitándose sólo al trazado de las acequias. Necesita poca nivelación de terreno, evitando los problemas de microrelieve presentes dentro del predio. Este método se puede emplear en todo tipo de suelos con menor o mayor eficiencia, dependiendo de las características del suelo, topografía y caudal disponible.

La desventaja del método radica en que presenta una eficiencia de aplicación no mayor al 30%, debido a excesivas pérdidas por escurrimiento superficial y percolación profunda. La distribución del agua tiende a ser desuniforme, resultando sectores con exceso y falta de humedad. No se recomienda para terrenos con mucha pendiente por alto riesgo de erosión. Se produce una excesiva subdivisión del terreno por el gran número de

acequias y desagües que se deben trazar, exigiendo una gran cantidad de mano de obra y habilidad del obrero agrícola para manejar el riego por tendido en el predio.

3.2.2.2. Consideraciones del riego por inundación

A objeto de incrementar la eficiencia y entrega eficaz del agua de riego, no se debe regar con volúmenes excesivos de agua, para evitar incrementos en la velocidad de escurrimiento. El riego nocturno se debe evitar porque se pierde el control de éste, provocando pérdidas innecesarias por escurrimiento superficial y percolación profunda. Hasta el día de hoy es usual determinar en forma visual cuánto y cuándo regar. Sin embargo, se debe enseñar al agricultor que no sólo observe la humedad del suelo en los primeros 10 centímetros, sino que, a través de muestreos de suelo, ver la profundidad de mojamiento hasta la zona efectiva de raíces.

Si bien el sistema de riego por tendido es el más utilizado en el mundo y en Chile, su uso ha estado limitado indirecta y directamente por los diferentes escenarios de cambio climático y conciencia de las personas, por preservar el recurso hídrico y usarlo cada vez de manera más racional y óptima. Por otro lado, se ha observado que la energía eléctrica se hace cada vez más costosa, por lo que de alguna manera se ha venido sopesando el uso de sistemas presurizados por los gravitacionales, principalmente el método de riego por surcos y sus mejoras que han sido igualmente eficiente y eficaces. Por último, hay que recordar que no existe un sistema o método de riego ideal y uno mejor o peor que otro, por lo que elegir un método presurizado y gravitacional está supeditado solo al que lo va a utilizar, el lugar físico y el dinero disponible para implementar dicho sistema o método.

3.2.3. Riego por surco

El agua es conducida a través de pequeños surcos de riego desde puntos altos hacia sectores bajos del potrero. Este sistema se adapta muy bien a cultivos en hilera (hortalizas, papas, maíz, entre otros), y en menor grado a frutales menores y mayores (frambueso, mora híbrida, manzano, duraznero, entre otros). Este método presenta una mejor eficiencia de aplicación que el de inundación, y puede ir desde un 45 hasta un 85% según las mejoras y manejos empleados. Para este caso se tratarán los surcos rectos y en contorno por ser los más utilizados en el sur de Chile.

3.2.3.1. Rectos

Esta variación consiste en la entrega de agua desde una acequia madre (red de riego), a pequeños canales ubicados entre las hileras de siembra o plantación. El sistema puede ser usado tanto en terrenos planos como con pendientes que no superen el 2% en sentido del riego (Foto 1).



Foto 1. Sistema de riego por surco recto en el cultivo del frambueso. a) no regado y b) regado (López-Olivari, 2014).

3.2.3.2. Contorno

Esta variante consiste en trazar los surcos siguiendo la curva de nivel del terreno. Este tipo de riego es muy útil para manejar el agua en sectores ondulados, con fuerte pendiente (4 a 10%) o fácilmente erosionables. También, es empleado en cultivos en hilera y en huertos frutales (Foto 2). Sin embargo, no se recomienda utilizarlo en suelos con textura arenosa, ni en suelos que al secarse se agrieten. Como una ventaja adicional los regueros en contorno sirven como desagües en los períodos de abundante precipitación. En el Cuadro 3 se muestran algunos espaciamientos recomendados de regueros en contorno, en función de la pendiente del terreno.

Cuadro 3. Espaciamientos recomendados para los regueros en contorno de acuerdo a la pendiente del terreno.

Pendiente (%)	Espaciamiento (m)
4 - 6	20
6 - 8	15
8 - 10	10



Foto 2. Sistema de riego por surco en contorno usado en hortalizas (lechuga) (López-Olivari, 2014).

3.2.3.3. Parámetros de diseño de riego por surco

A fin de utilizar el método por surco con una alta eficiencia, se requiere tener el terreno bien nivelado para que los surcos no se rompan o el agua se acumule en algún sector del terreno. Lograr dicho cometido implica considerar los siguientes aspectos de diseño:

a) Sección o tamaño del surco: la sección del surco debe tener un tamaño tal que pueda conducir el agua y llevarla de manera uniforme a través del largo de la hilera. Surcos estrechos y poco profundos trasladan muy poco caudal, causando una disminución de la eficiencia de aplicación. La forma de la sección del surco está dada por la herramienta empleada en su construcción. Sin embargo, las formas más comunes son la sección en “V” (triangular) y la sección en “U” (semi-circular) a una profundidad variable (Figura 4). El tamaño de la sección determina en gran medida el perfil de humedecimiento del suelo según el perímetro de mojado (fondo y paredes del surco).

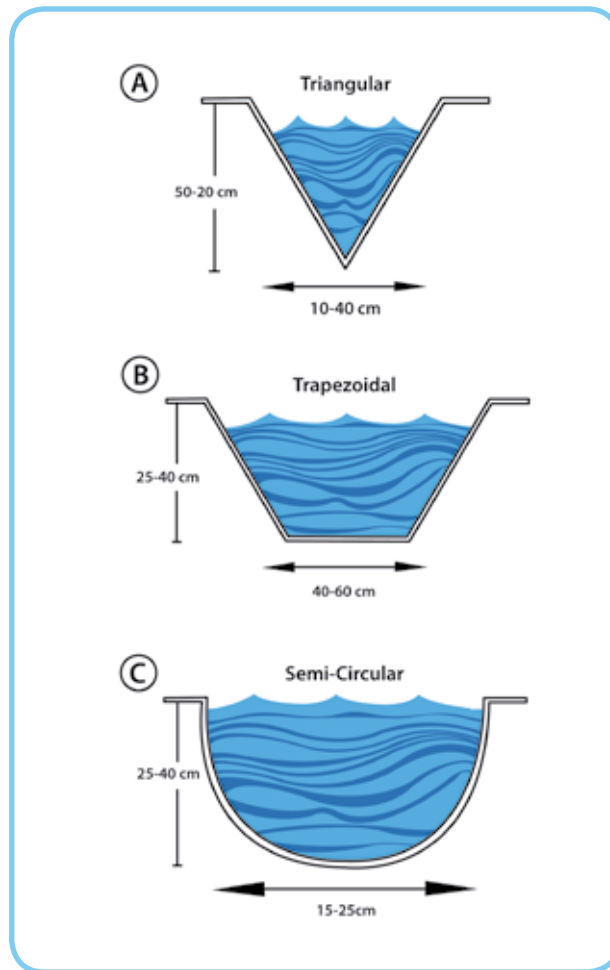


Figura 4. Formas y dimensiones de 3 diferentes secciones de un surco de riego (López-Olivari, 2014).

b) Espaciamiento entre los surcos: la separación entre un surco y otro está determinado, principalmente, por el cultivo, la maquinaria agrícola y el tipo de suelo. Si se desea plantar un frutal (ejemplo frambueso) el distanciamiento entre una hilera y otra será mayor que para un cultivo herbáceo como la papa (Foto 3), ya que por lo general en la entre hilera circula maquinaria agrícola. Este último factor, es un aspecto a considerar, dado que las labores que se realizan de manera mecanizada no deben entorpecer el diseño del riego. Finalmente, el tipo de suelo determina fuertemente la relación textura/humedad, ya que que el movimiento horizontal y vertical del agua en el suelo básicamente depende de ello. En suelos de textura arenosa el agua se mueve más en profundidad que horizontalmente, por lo que la separación de los surcos a cada

lado de la hilera no deben superar los 50 cm. Lo anterior, es para que se produzca el traslape bajo el camellón donde se encuentra la zona radicular de la planta (Figura 5). Para suelos de textura franca y algunos suelos de origen volcánico (Andisoles) presentan una infiltración más equilibrada que va en sentido vertical y horizontal, por lo que la distancia de los surcos a cada lado de la hilera no debe exceder los 80 cm. En suelos de textura arcillosa el movimiento del agua se produce más rápido de manera horizontal que vertical, por lo que el espaciamiento de los surcos no deben superar los 110 cm para lograr un mejor traslape en la base del camellón (Figura 5). Esto hace que los perfiles de mojado también varíen para suelos de textura arenosa, franca y arcillosa. Una manera práctica de ver si la distancia entre surcos contiguos es la adecuada, es conveniente realizar una prueba en campo antes de la siembra o plantación:

- 1.- Se realizan dos surcos a una distancia determinada y se aplica agua de riego.
- 2.- Se realiza un orificio en la mitad del camellón (entre los dos surcos) con una pala o barreno, verificando si hubo traslape de humedad hasta donde potencialmente estará la zona de raíces final.
- 3.- Si se observa que no hubo un traslape suficiente en el camellón, éstos debieran juntarse hasta alcanzar dicha condición.

Si ya se encuentra el surco hecho y el cultivo elegido está en crecimiento activo, con un barreno o una herramienta de campo (ejemplo; pala) se puede verificar si existe un traslape de humedad bajo el camellón y si el agua ha llegado hasta la profundidad efectiva de raíces. De esta manera práctica, se puede ver si el agua aplicada a los surcos es la adecuada y se distribuye de manera uniforme (Foto 4).

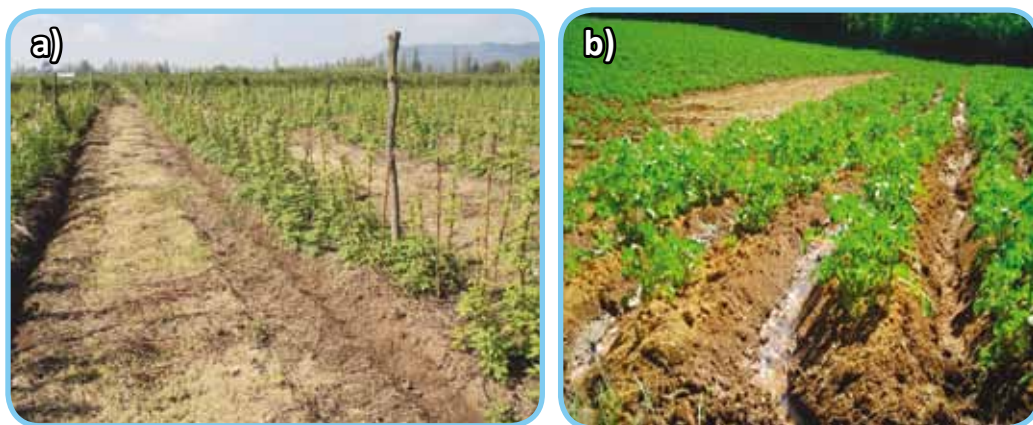


Foto 3. Distanciamiento entre una hilera y otra con surcos hechos en cada lado de la hilera.
a) Frambueso (López-Olivari, 2014) y b) Papa (INIA Carillanca, 2014).

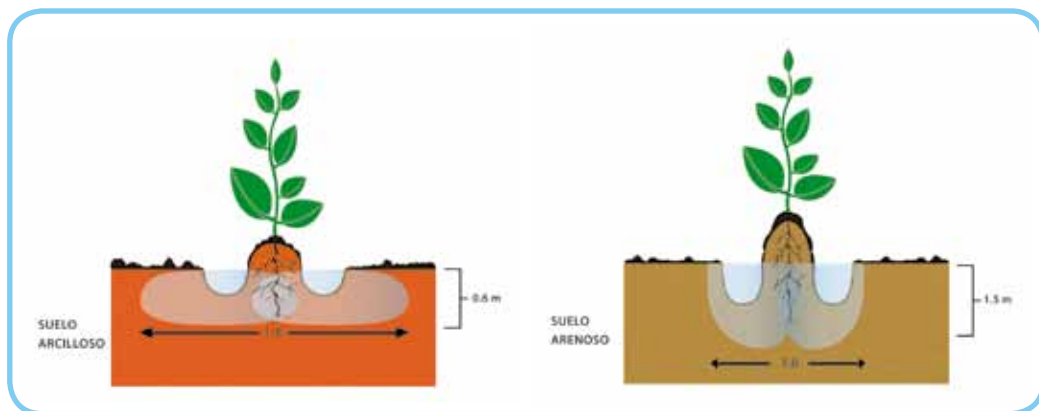


Figura 5. Perfil de humedecimiento de dos tipos de suelo regados por surco (López-Olivari, 2014).



Foto 4. Perfil de humedecimiento a profundidad efectiva de raíces en el cultivo. a) y b) frambueso y c) papa (López-Olivari, 2014).

c) Largo del surco: el objetivo principal del método por surco es permitir que el agua infiltrada a lo largo de éste sea uniforme. Surcos muy cortos aumenta el uso de mano de obra, costos de instalación, mayor cantidad de acequias, dificultando las labores mecanizadas. Sin embargo, el largo de los surcos depende de la pendiente del terreno, la textura de suelo, la profundidad radicular y el caudal de riego. Pendientes suaves permiten longitudes más largas del surco de riego, mientras que pendientes mayores hacen que aumente la velocidad del agua provocando riesgos de erosión del suelo, siendo más susceptibles los suelos arenosos que arcillosos. Si la pendiente se hace mayor a 2% (2 m de altura cada 100 m de largo), se recomienda utilizar surcos en contorno.

Los suelos con textura arcillosa pueden tener surcos más largos que un suelo de textura arenosa. Cultivos que presentan raíces con arraigamiento profundo requieren de una mayor cantidad de agua de riego por lo que pueden emplearse surcos más largos. En cuanto al caudal de riego, se debe ajustar al largo y pendiente de los surcos. Al inicio del surco de riego el caudal de agua que ingresa debe ser el máximo no erosivo (agua de riego aplicada a un surco sin que se produzca desplazamiento de suelo en el mismo), para que cuando el agua llegue al final del mismo se reduzca a la mitad el caudal y se complete el tiempo de riego (Cuadro 4 y Figura 6). Así, las pérdidas por percolación profunda en la cabecera del surco y el escurrimiento superficial al final del mismo pueden disminuir en gran parte.

Si aplicamos poco tiempo de riego al surco, también se produce un cambio en el patrón de crecimiento de las plantas, mostrándose más vigorosas al inicio y medio de la hilera, y poco crecimiento vegetativo al final del surco por no alcanzar a mojar el perfil efectivo de las raíces (Figura 7a). Cuando se dejan muy largas las hileras se produce un crecimiento desuniforme del cultivo, mostrándose más altos al medio de la hilera y con menos desarrollo vegetativo al inicio y final del surco, tanto por estrés debido al exceso como por falta de agua. Esto se produce porque el perfil de avance del agua en el surco no es recto como se muestra en la Figura 7b.

Cuadro 4. Longitud (m) y caudal máximo recomendado en surcos de riego, según pendiente (S) y textura de suelo.

Textura		Gruesa (Arenoso)			Media (Franco)			Fina (Arcilloso)		
S	Q _{max} ^(*)	Lámina de agua a aplicar (cm)								
(%)	(l/s)	5	10	15	5	10	15	5	10	15
0,25	2,50	150	220	265	250	350	440	320	460	535
0,50	1,25	105	145	180	170	245	300	250	310	380
0,75	0,83	80	115	145	140	190	235	175	250	305
1,00	0,63	70	100	120	115	165	200	150	230	260
1,50	0,41	60	80	100	95	130	160	120	175	215
2,00	0,23	50	70	85	80	110	140	105	145	185
3,00	0,21	40	55	65	65	90	110	80	120	145
5,00	0,12	30	40	50	50	70	85	65	90	105

(*): El caudal máximo no erosivo es Q_{max} = 0,63/S. Los valores de Q_{max} pueden ser recalculados según el caso particular que corresponda (adaptado de Jerez et al., 1994).



Figura 6. Regulación del caudal máximo no erosivo usando sifones.

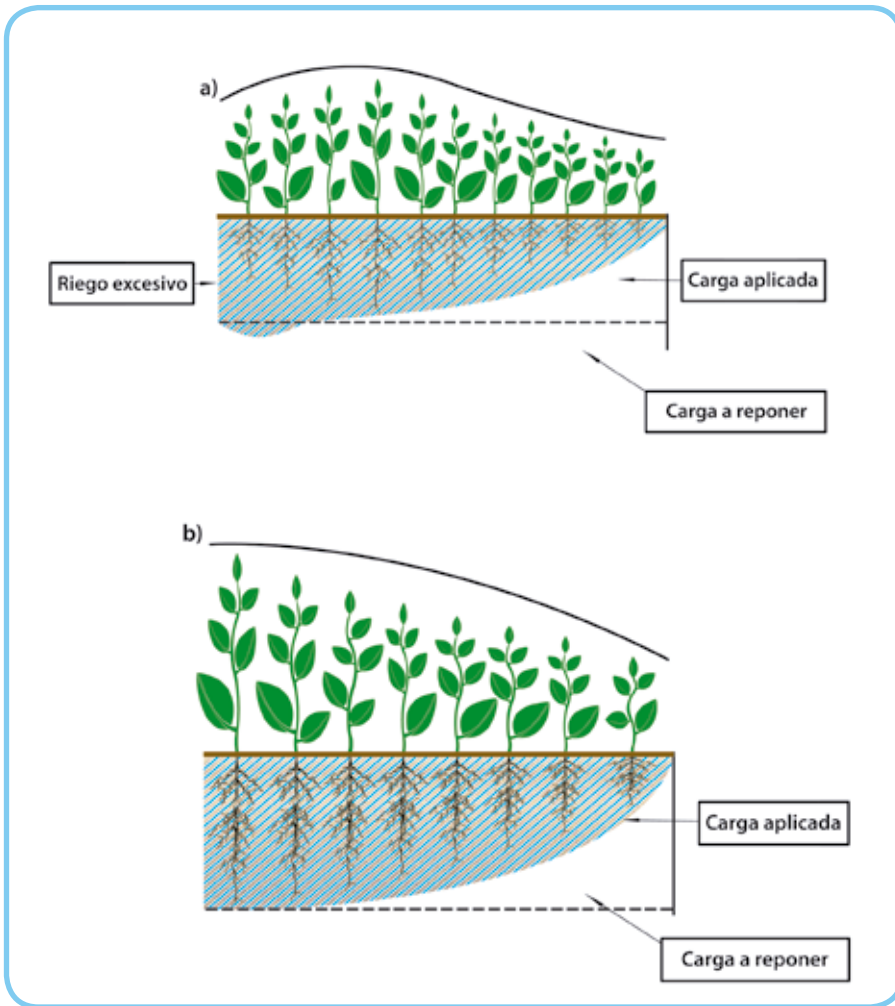


Figura 7. Esquemas del perfil de avance del agua en la hilera. a) poco tiempo de riego en el surco y b) para un surco muy largo. La línea superior describe la forma de crecimiento del cultivo en la hilera (López-Olivari, 2014).

Una de las principales ventajas del sistema de riego por surco es:

- Permite regar cultivos sensibles al humedecimiento del suelo en la zona del cuello o tronco de la planta.
- Es posible conseguir una aplicación uniforme del agua en el perfil de suelo, logrando una buena eficiencia (promedio entre 40-70%).

- Se puede lograr un buen control del caudal de agua aplicado a los surcos.
- Tiene bajo costo de aplicación, especialmente, en mano de obra
- Se puede adaptar a cultivos sembrados o plantados en hileras.

Las desventajas de este sistema radican en:

- Se requiere nivelación del suelo en el sentido del riego.
- Se debe considerar criterios de programación del riego (frecuencia y tiempo de riego) y diseño del riego (largo y espaciamiento del surco, pendiente del suelo y caudal a emplear) para lograr una alta eficiencia
- No es recomendable utilizarlo en suelos con pendientes mayores a 2%.
- No se recomienda usarlo en suelos arenosos por su alta velocidad de infiltración, teniendo que subdividir demasiado el terreno por la gran cantidad de surcos cortos; y requiere de algunos costos de inversión, fundamentalmente, por la nivelación del suelo.

3.2.4. Mejoras del riego gravitacional

Las diferentes variaciones existentes en el método de riego gravitacional se encuentran orientadas principalmente a mejorar la conducción y distribución del agua de riego por los regueros y a bajo costo. Dentro de estas mejoras para el riego por inundación se encuentran:

a) Regueros en contorno: se recomiendan en terrenos ondulados o en pendientes difíciles de nivelar. Se deben trazar las acequias siguiendo las curvas de nivel, considerando pendientes no mayores a 0,5% para facilitar la distribución y aplicación del agua de riego.

b) Conectores de derivación: pueden ser de madera o tubos de PVC que permiten la salida del agua de riego desde un canal, mejorando la distribución y entrega del agua al potrero. Lo anterior evita que el regador haga tacos en las acequias y rompa el borde del canal.

c) Caudal no erosivo: aplicar el agua a un máximo caudal que permita cubrir una superficie en el mínimo tiempo posible, sin generar erosión en el suelo.

d) Tiempo de riego: para encontrar el tiempo de riego óptimo se debe regar sectores del predio con diferentes tiempos y después de 2 a 3 días de haber regado; sacar muestras de suelo, con el fin de verificar hasta qué profundidad alcanzó a mojarse. Una vez realizado esto se elige el tiempo que haya humedecido mejor la profundidad efectiva de raíces.

Dentro de las mejoras para riego por surco se encuentran:

a) Distribución californiana: consiste en distribuir el agua de riego a través de una red de tuberías livianas, que funcionan a una menor presión (1 metro máximo de desnivel), que las de los sistemas de riego localizados de alta frecuencia (goteo o microaspersión). Este tipo de distribución aprovecha la topografía local, regulando y controlando los caudales. El agua es entregada en los surcos, platabandas o bordes. El sistema se adapta muy bien a cultivos permanentes que sean regados por surco como algunos frutales menores (frambueso y mora híbrida), entre otros (Figura 8).

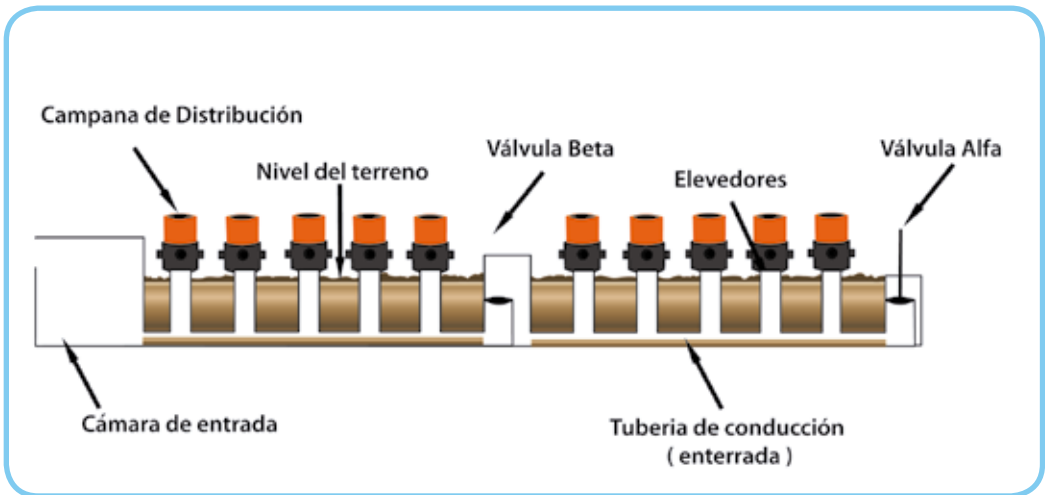


Figura 8. Vista esquemática de un sistema de riego californiano fijo (López-Olivari, 2014).

Las ventajas de este sistema son:

- Aumenta la eficiencia de riego, ya que mejora la conducción y distribución del agua.
- Comparado al sistema de riego tradicional, solo necesita entre un 25 y 50% de la mano de obra.
- Evita el desarrollo de malezas al inicio de la cabecera del riego.
- Disminuye las pérdidas de agua por infiltración y evaporación por la eliminación de las acequias de distribución.
- Debido a lo anterior, incrementa el potencial de superficie cultivada
- Facilita el paso de maquinaria agrícola por la eliminación de las acequias.
- Sistema de riego de bajo costo
- Utiliza tuberías de bajo espesor y cargas hidráulicas.

Las principales desventajas es que no es posible:

- Aplicación de fertilizantes y pesticidas en el agua de riego
- Requiere una supervisión de manera continua para evitar anegamientos.
- El sistema puede encarecer si el terreno presenta mucha pendiente, debiendo utilizar un sistema de válvulas para regular la velocidad y presión del agua.

b) Distribución por mangas plásticas: este permite conducir el agua de riego dentro del sector a regar y distribuirla a los surcos de riego a través de salidas equidistantes con caudales controlados y a muy bajo costo. Los componentes del sistema de riego por surco usando mangas plásticas son: a) captación de agua; b) manga de conducción; c) manga regadora; d) válvula de entrada; e) tambor regulador de presión; y f) tubos de PVC según el caso (Foto 5).

Las ventajas de este sistema son similares al riego californiano. La mayor diferencia radica en que la manga plástica es más económica (aproximadamente entre 60 y 70% menos en 1/4 de hectárea). Así, se transforma en una buena alternativa para mejorar el uso del agua de riego intrapredial en frutales menores en hilera (frambueso, mora híbrida, otros) y cultivos en hilera (papa, quínoa, hortalizas, otros) para el sur de Chile. Sin embargo, la gran diferencia con el sistema californiano, es que la manga plástica no va enterrada y presenta una menor durabilidad.

La manga plástica se puede deteriorar por diversas causas, tales como: rayos solares, exceso de presión, mal manejo en especial cuando se instalan o se dejan de usar. Para evitar estos daños es recomendable no dejarlas expuestas al sol sin necesidad, evitar contacto con espinas o piedras (superficies pedregosas), vaciar completamente las mangas antes de moverlas, cuidar el pisoteo de animales y después de la temporada, guardarlas sin agua y enrolladas. Teniendo en cuenta dichos cuidados potencialmente pueden durar de 2 a 3 temporadas de riego agrícola.



Foto 5. Componentes del sistema de riego por surco a través de mangas plásticas usadas en el cultivo de papa en la comuna de Traiguén (López-Olivari, 2016).

c) Distribución por pulsos: este sistema se basa en aplicar el agua a los surcos en intervalos de tiempos cortos pero frecuentes en un mismo período de riego. El agua se entrega por medio de una válvula instalada en la manga plástica, donde ésta abre y cierra para dar los pulsos de riego. Lo anterior dependerá del tiempo de riego, largo del surco y tipo de suelo. Actualmente, esta forma de riego se ha modernizado automatizando la apertura y cierre de la válvula, con el objetivo de entregar una autonomía al sistema. En INIA Rayentué (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins) se ha implementado dicho sistema con el objetivo de mejorar la optimización y uso efectivo del agua para aumentar la productividad, específicamente en el cultivo de maíz (Foto 6). Las diferentes válvulas del sistema son accionadas por un dispositivo electrónico que abre y cierra el paso del agua alimentado energéticamente a través de un panel solar, permitiendo mojar de manera alternada a lo largo del surco. Así, el agua de riego cuando avanza a lo largo del surco se encuentra con una superficie que ya ha sido previamente mojada, permitiendo regar toda la extensión del surco de una forma más homogénea. Lo anterior, hace posible incrementar la eficiencia del riego hasta un 85%, comparado a un 45% alcanzado en el riego por surcos tradicional.

Las ventajas de este sistema radican en que el riego por pulsos permite:

- Ahorrar agua de riego (entre 40 y 50%).
- Regar surcos de mayor longitud.
- Bajo costo de mantención.
- Se puede utilizar en un mayor rango de pendientes (hasta 2%); e) permite un ahorro de tiempo por parte del regador y mano de obra para riego.
- Presenta la posibilidad de incorporar el Fertirriego.
- Permite una reducción de la lixiviación (infiltración de agua de riego más allá de la profundidad efectiva de raíces) del fertilizante.



Foto 6. Riego por pulso automatizado e inyección de fertilizante al sistema en el cultivo del maíz (cedido y adaptado INIA Rayentué, 2014).

3.3. Riego presurizado

Este método necesita de una unidad de bombeo que genere la presión que requieren los elementos del equipo para funcionar adecuadamente. Dentro de este sistema existen dos grandes grupos: a) riego presurizado de baja frecuencia y b) riego localizado de alta frecuencia. Uno de los objetivos principales del riego presurizado es aplicar el agua de manera más precisa que el riego gravitacional, evitando aún más las pérdidas de agua, aumentando la eficiencia de aplicación de hasta un 90% en el caso del riego por

goteo. Lo anterior, conlleva a mejorar aún más la distribución del agua en el terreno, con el fin de favorecer un desarrollo homogéneo del cultivo, permitiendo la obtención de mayores y mejores rendimientos. Así, nuestro propósito será tratar con mayor detalle el sistema de riego por aspersión (baja frecuencia) y el sistema de riego por goteo, cinta y microaspersión (alta frecuencia).

3.3.1. Situación actual del sur de Chile

El sistema de riego presurizado en Chile representa un 28% de las áreas regadas con cultivos, hortalizas, frutales y otros sistemas de producción. De este 28%, el 23% corresponde a riego presurizado de alta frecuencia (goteo, cinta y microaspersión) y cerca del 5% a riego presurizado de baja frecuencia (aspersión). Por otro lado, los diferentes métodos de riego presurizados desde la Región de La Araucanía hacia el sur, se observa un cambio importante comparado al resto del país, pasando desde sistemas presurizados de alta frecuencia a sistemas presurizados de baja frecuencia. Si lo analizamos por región (Gráfico 8), Los Lagos y Los Ríos presentan más del 60% de la superficie regada bajo un sistema presurizado de baja frecuencia (riego por aspersión), seguido de Aysén (mayor al 50%) y La Araucanía (mayor al 25%). Si se comparan estos valores con los obtenidos en el 1997, se ha producido un incremento muy importante en la inversión por tecnificación, principalmente riego presurizado de baja frecuencia (riego por aspersión) desde las regiones de La Araucanía a Magallanes. Este cambio se debe a que son grandes zonas productoras de forraje para la industria cárnica y lechera; hay un aumento en los cultivos industriales; y el cultivo de papa. Así también existe un importante desarrollo de frutales mayores y menores que ha potenciado la inversión de riego presurizado de alta frecuencia como es el riego por goteo. Así, en la Región de La Araucanía ha llegado a casi 60 mil hectáreas regadas por sistemas presurizados.



Gráfico 8. Porcentaje de métodos de riego presurizados utilizados a nivel país y en las diferentes regiones de Chile.

3.3.2. De baja frecuencia

El riego presurizado de baja frecuencia es el riego por aspersión, donde el agua aplicada simula una lluvia sobre el suelo, con el objetivo que se infiltre en el mismo lugar donde cae. Dicha descarga de agua, se produce a través del paso de ésta a presión mediante tuberías, para salir finalmente por las boquillas de los aspersores. El riego por aspersión está compuesto esencialmente de una unidad de bombeo, red de tuberías principales y distribución (siendo de policloruro de vinilo (PVC), aluminio, fierro galvanizado o polietileno de alta densidad (HDPE)), y dispositivos de aspersión (Figura 9).

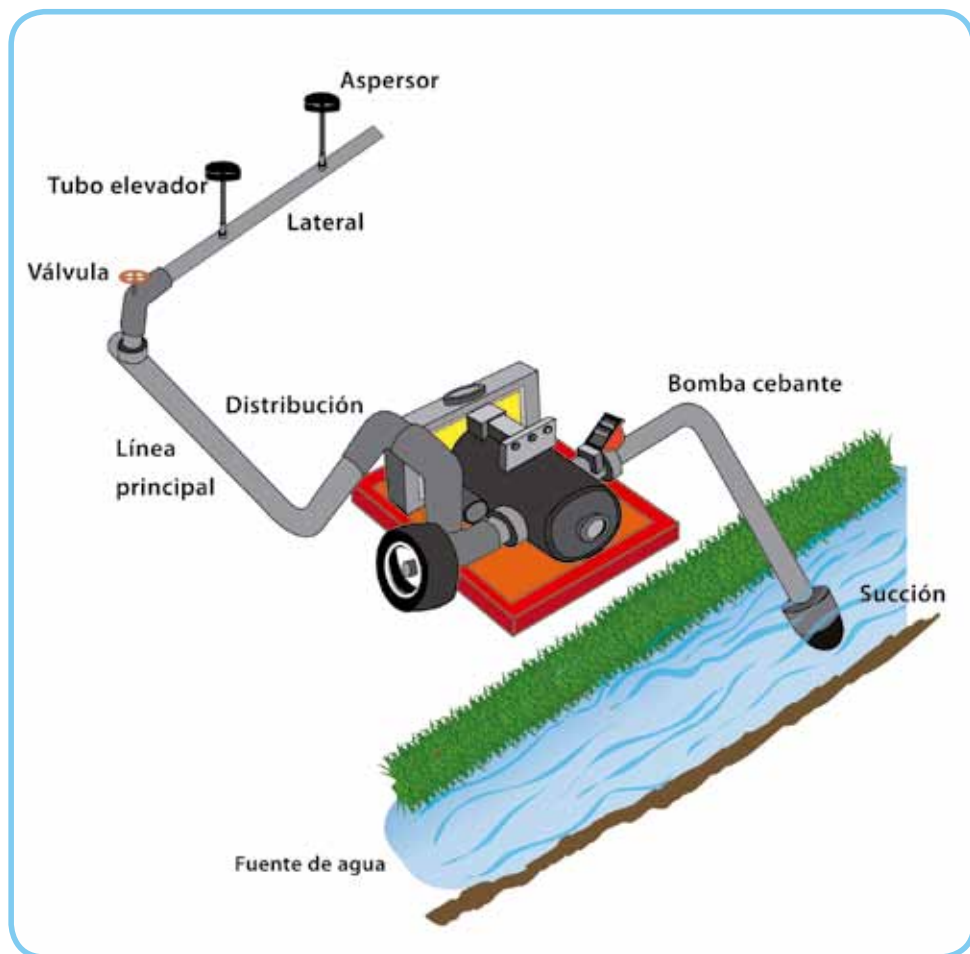


Figura 9. Componentes de un equipo de riego por aspersión (López-Olivari, 2014).

La unidad de bombeo es el equipo encargado de succionar el agua desde la fuente de agua e impulsarla a presión hasta la red de tuberías ubicadas en el predio. Esta unidad puede variar de tamaño y complejidad, dependiendo de las dimensiones del predio que se desea regar. La red de *tuberías principales* son las encargadas de llevar el agua hasta las tuberías de distribución, pasando por los accesorios y dispositivos presentes en las tuberías como llaves de paso, medidores de presión (manómetros), entre otros. La red de *tuberías de distribución* son las encargadas de distribuir el agua a través del campo o parcela, como son los ramales de alimentación y laterales regadoras que conducen el agua hasta los elevadores y emisores (los aspersores).

El riego por aspersión se hace irremplazable (si el riego superficial es inaplicable), por:

- Bajo terrenos de topografía no regular, ondulados y con pendientes fuertes.
- Suelos poco profundos y de difícil nivelación.
- Suelos que se erosionan fácilmente.
- Cuando se dispone de bajos caudales para regar durante largos períodos de riego (principalmente entre primavera y verano).

En la actualidad, existen muchos tipos de riego por aspersión (entiéndase que lo único que cambia son las estructuras físicas en donde van montados los aspersores), divididos en dos grandes grupos: a) Sistemas estacionarios, que pueden ser móviles, semifijo y fijos; y b) Sistemas mecanizados, que son los de desplazamiento de un aspersor de gran tamaño (carretes de riego) y desplazamiento de la línea o lateral de riego (laterales de avance frontal y los pivotes centrales). Para este caso, se enfatizarán los sistemas móviles o semi-móviles (cobertura total) y mecanizados como el riego por carrete y pivote central, por ser los sistemas de riego mayoritarios existentes en el sur de Chile.

3.3.2.1. Riego por aspersión estacionario

Comúnmente los sistemas estacionarios de aspersión están compuestos por un conjunto “motobomba”, al cual se acopla una red de tuberías matrices, submatrices y laterales de riego con aspersores sobre elevadores que son:

Los **sistemas móviles**: todos los elementos se pueden mover (grupo motobomba, red de tuberías principales y de distribución más los laterales y elevadores con aspersores). El grupo motobomba móvil puede ser accionado por la toma de fuerza de un tractor para succionar y enviar el agua hasta los aspersores. Este sistema suele ser utilizado en pequeñas superficies y usualmente se hace para realizar riegos de complemento. Es utilizado por ejemplo en praderas y papas (Foto 7).



Foto 7. Sistema de riego por aspersión estacionario móvil en el cultivo de papa (zona costera, Región de La Araucanía). a) cultivo de papa en crecimiento y b) cultivo de papa antes de emerger (INIA Carillanca).

Por otro lado, si la totalidad del terreno está cubierto por los laterales y aspersores se define como riego por aspersión con **Cobertura Total**. Este sistema se está utilizando cada día más porque requiere muy poca mano de obra, reduciéndose sólo casi a abrir y cerrar las llaves de paso. Es ideal en parcelas pequeñas y medianas con terrenos de forma irregular.

Para utilizar el sistema por aspersión hay que tener presente ciertas características de funcionamiento, tales como:

Marco de riego: es la distancia existente entre dos líneas contiguas de riego y entre un aspersor y otro de la misma línea de riego. La disposición en cuadrado y rectángulo (más comunes; 6 x 6 m, 6 x 12 m, 12 x 12 m, 12 x 18 m y 18 x 18 m) son las más usadas en los riegos con laterales móviles. Normalmente corresponden a múltiplos de 6, debido a que las tuberías se fabrican en esa longitud. En la práctica es más fácil cambiar los tubos en terreno. En cada disposición el área o superficie (S) regada está dado por:

$$S = a^2$$

Para obtener una mejor uniformidad del riego, hay que determinar cuál es la mejor distancia entre cada aspersor contiguo y entre laterales de riego, en relación al radio de alcance del chorro y velocidad de viento. Así, el fabricante debe entregar la información necesaria del comportamiento real de la uniformidad del modelo elegido para los distintos marcos de riego. Para las condiciones del sur de Chile, donde existe una alta variabilidad en las velocidades del viento, se recomienda utilizar marcos de riego menores a 12 x 12 m para lograr un buen traslape de mojamiento, evitando pérdidas por evaporación, deriva y costos (bencina o electricidad). Algunas separaciones máximas referenciales de aspersores y líneas según la velocidad del viento se encuentran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Separación máxima entre aspersores y líneas de riego referenciales en función del radio de mojado del aspersor (R) y de acuerdo a la velocidad del viento.

Velocidad viento (km/h)	Velocidad viento (m/s)	Espaciamiento entre aspersores (m)	Espaciamiento entre laterales o líneas (m)
8 - 11	2,22 - 3,05	0,8R	1,3R
11 - 16	3,05 - 4,44	0,8R	1,2R
> 16	> 4,44	0,6R	R

Distribución del agua: el agua aplicada por cada aspersor no se distribuye de manera uniforme en el suelo, sino que va cambiando a lo largo del radio de alcance del aspersor. La zona más cercana al aspersor recibe mayor cantidad de agua, disminuyendo a medida que incrementa la distancia desde el aspersor. Así, para poder alcanzar una mayor uniformidad es necesario que exista un traslape entre aspersores contiguos (Figura 10).

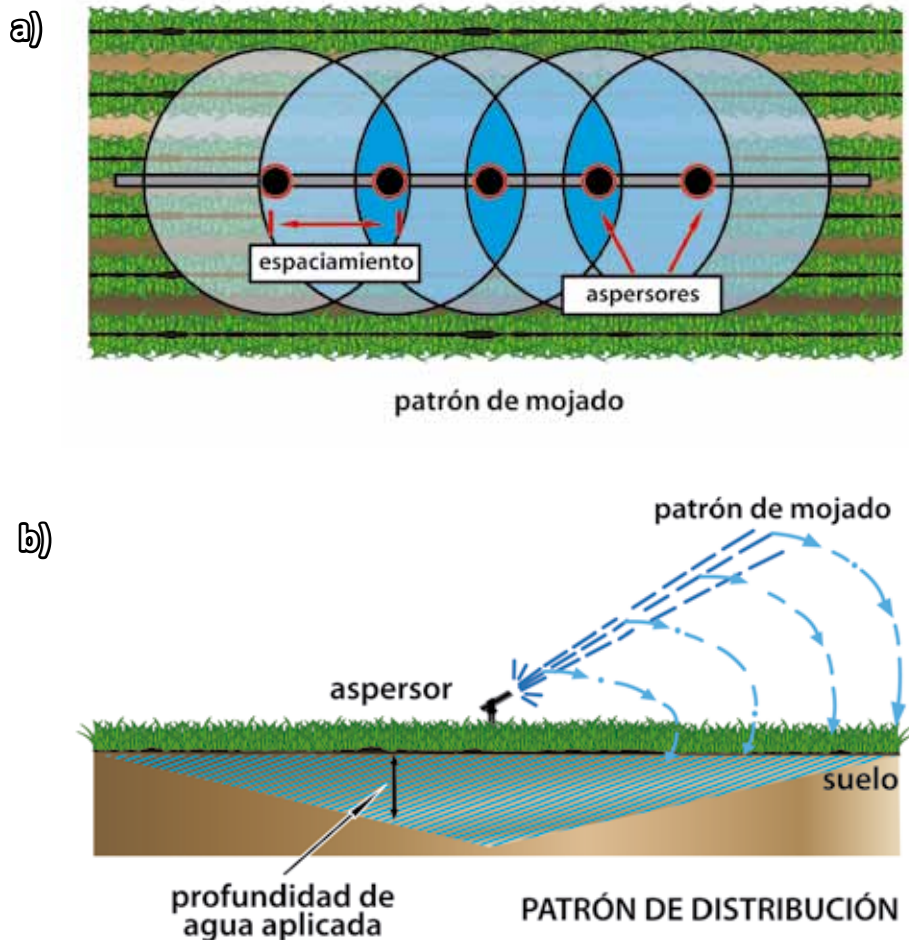


Figura 10. Patrón de distribución del diámetro de mojado bajo el aspersor y traslape (López-Olivari, 2014). a) Patrón de mojado y forma de distribución de mojado y b) vista transversal del mojado en profundidad de un aspersor.

Pluviometría o precipitación: es la cantidad de agua que descarga un aspersor sobre una superficie de terreno. La precipitación se mide cuantificando la cantidad de agua que recibe el suelo en un período de tiempo (mm/h o L/h). Para que la entrega de agua al cultivo y el uso de ésta sean eficaces, la descarga de cualquier modelo de aspersor debiera ser igual o inferior a la velocidad de infiltración básica del suelo, a objeto de evitar escurrimiento y anegamientos del terreno.

Un aspersor individual no entrega la precipitación de agua de riego sobre el suelo de manera uniforme. En tal sentido, se debe considerar un marco de riego para producir un traslape entre aspersores contiguos y entre laterales de riego. De esta manera, la cantidad de agua precipitada media de un marco de riego escogido puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$P = 3.600 \left(\frac{Q}{S} \right)$$

Donde, P es la pluviometría o precipitación (mm/h); Q es el caudal del aspersor (L/s) y S es la superficie de suelo regada (m^2).

Ejemplo: un agricultor instaló un sistema de riego por aspersión de cobertura total para regar una superficie de papa tardía. La empresa de riego le entregó la información del caudal real del aspersor con una boquilla siendo de 0,25 L/s para un marco de riego en cuadrado de 12 x 12 m. Se desea saber cuánto será la precipitación del aspersor bajo este escenario.

La superficie de riego de cada aspersor sería:

$$S = 12 \times 12 \text{ m} = 144 \text{ m}^2$$

La pluviometría de un aspersor sería:

$$P = 3.600 \left(\frac{Q}{S} \right) = 3.600 \left(\frac{0,25}{144} \right) = 6,25 \text{ mm/h}$$

Caudal de un aspersor: está determinado por el diámetro de la boquilla y su presión de funcionamiento. La selección del aspersor se realiza por tanteo entre varios modelos hasta encontrar el que más se adapte a las condiciones de cada situación en particular. Dicha información se encuentra en los catálogos de los diferentes aspersores y marcas existentes en el mercado (Cuadro 6).

Cuadro 6. Aspersor de giro completo (ejemplo de catálogo)

	1/8" 3,2 mm.		9/64" 3,6 mm.		5/32" 4,0 mm.		11/64" 4,4 mm.		3/16" 4,8 mm.		13/64" 5,2 mm.		7/32" 5,6 mm.	
Bars	Lit./h.	Ø mts.	Lit./h.	Ø mts.	Lit./h.	Ø mts.	Lit./h.	Ø mts.	Lit./h.	Ø mts.	Lit./h.	Ø mts.	Lit./h.	Ø mts.
2,5	620	26,0	790	26,5	970	27,5	1.160	29,0	1.390	31,0	1.640	31,5	1.720	33,0
3,0	680	26,0	860	26,5	1.050	28	1.270	29,5	1.510	32,0	1.790	32,5	1.880	34,0
3,5	740	26,5	930	27,0	1.140	29,5	1.380	31,0	1.640	33,0	1.930	33,5	2.140	35,0
4,0	790	26,5	1.000	28,0	1.220	29,5	1.470	32,0	1.750	33,5	2.060	34,5	2.240	36,0
4,5	840	27,0	1.060	29,0	1.290	30,0	1.550	32,5	1.860	34,0	2.180	35,0	2.410	36,5
5,0	880	27,50	1.120	29,5	1.360	30,5	1.640	33,0	1.960	34,5	2.290	35,5	2.520	37,5
5,5	930	28,0	1.170	30,0	1.430	31,0	1.720	34,0	2.060	36,0	2.380	36,0	2.640	39,0

(*Aspersor a 1 metro de altura)

Siguiendo con otro ejemplo y con la ayuda del catálogo modelo presentado en el Cuadro 6, se seleccionó el aspersor de boquilla de 4,0 mm (5/32"), cuyas características son:

Presión de operación = 3,5 bares = 35,7 m.c.a.

Descarga = $(1.140 \text{ l/h}) / (3.600 \text{ s}) = 0,32 \text{ l/s}$

Diámetro de mojamiento = 29,5 m

Además, la velocidad del viento es de 3,5 m/s se considera un traslape de 80% del radio de mojamiento (Cuadro 6):

Espaciamiento aspersores = $(29,5/2) * (80/100) = 11,8 \text{ m}$

Espaciamiento laterales = $(29,5/2) * (120/100) = 17,7 \text{ m}$

Así, si se elige un marco dispuesto en cuadrado sería de 12 x 12 m, mientras que para un marco dispuesto en rectángulo sería de 12 x 18 m, ya que las tuberías se comercializan en tramos de 6 m y 3 m.

Pulverización: este parámetro depende del diámetro de boquilla y la presión de funcionamiento. El tamaño de las gotas se ve incrementado a medida que disminuye la presión de trabajo, mientras que el tamaño de gota aumenta cuando incrementa el diámetro de la boquilla.

Las gotas de gran tamaño pueden producir daños físicos por efecto del impacto que tienen éstas en cultivos sensibles como algunas hortalizas, flores o tubérculos. Además, pueden provocar pérdidas económicas si tales daños físicos se producen en los órganos de las plantas de interés comercial. También, éstas pueden producir compactación del terreno en suelos de textura arcillosa (finas), reduciendo la velocidad de infiltración y producir riesgo de erosión anegamiento y escurrimiento superficial. Por otro lado, precipitaciones muy finas de gota pueden ser fácilmente llevadas por el viento y perderse por evaporación.

Otro punto importante son los factores que pueden afectar la instalación del sistema de aspersión, y por ende, interferir directamente en la eficiencia, uso eficaz del agua y uniformidad en el sistema de riego por aspersión. En este sentido, los factores más relevantes en la instalación son *climáticos*, *agronómicos*, *técnicos*, *económicos* y *prácticos*.

Factores climáticos: el primero de ellos es **el viento**, el cual directamente distorsiona la distribución del agua y el patrón de mojado del aspersor en el suelo. La magnitud de tal distorsión está directamente relacionada a la velocidad del viento y el tamaño de la gota (Figura 11). Para minimizar estos efectos se recomienda regar en horas cuando existe muy poca intensidad de viento (< 2 m/s). Si esto no es posible, lo aconsejable es utilizar aspersores de menor alcance, bajo ángulo de boquilla ($< 20^\circ$) y que funcione a baja o mediana presión, con el fin de evitar la pulverización de las gotas por evaporación. El segundo factor es la **temperatura**, que si es alta, provoca pérdidas por evaporación. Sobre todo si la precipitación de agua por parte del aspersor es muy pulverizada. Lo anterior puede evitarse utilizando aspersores con boquillas de mayor diámetro y que funcionen a mediana presión.

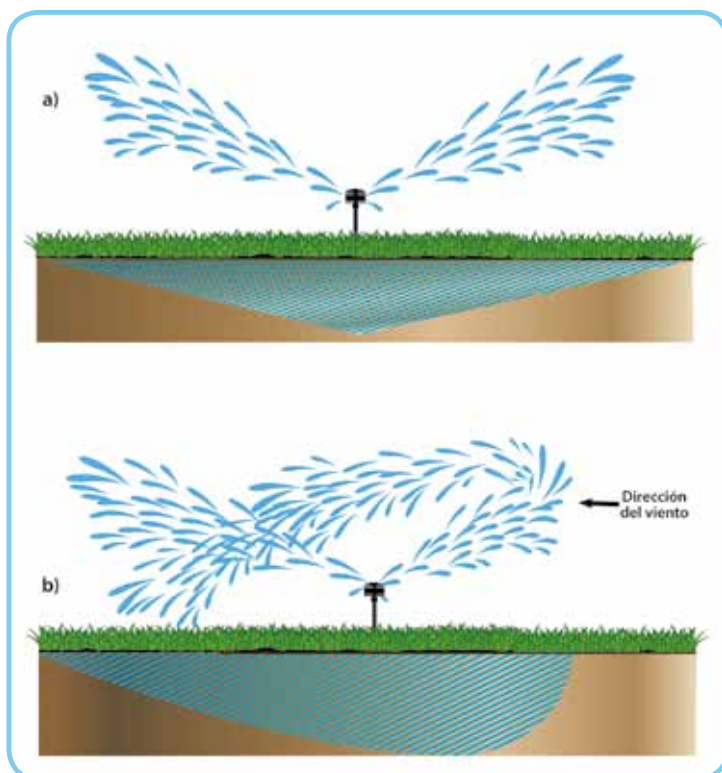


Figura 11. Movimiento del agua de riego de un aspersor y su patrón de mojado producido en el suelo en función de la velocidad del viento. a) sin viento y b) con viento (López-Olivari, 2014).

Factores agronómicos: el primero de ellos es el **agua**. Es necesario aclarar que al usar aguas sucias se debe utilizar aspersores con boquillas grandes para evitar que se tapen. El segundo factor es el **suelo**, donde la velocidad de infiltración del agua restringe las intensidades de precipitación máxima de los aspersores (Cuadro 7). Es decir, gotas de agua muy gruesas provocan compactación en algunos suelos, disminuyendo la velocidad de infiltración. Se aconseja utilizar aspersores que generen una lluvia más o menos fina. El tercer factor es el **cultivo**, donde el tipo de cultivo, su altura y la cobertura sobre el suelo determinan en gran medida el tipo de instalación. Cultivos muy frágiles (flores y algunos cultivos hortícolas) necesitan precipitaciones más débiles con gran pulverización y evitar daños por gotas de gran tamaño, exigiendo menos distancia entre aspersores. Mientras que en praderas, se utilizan aspersores de gran alcance por un efecto, principalmente, económico, y no necesariamente porque sea una aplicación efectiva y uniforme del agua al cultivo. Por último, el factor **topográfico** limita el tipo de instalación, ya que en terrenos con pendientes medianas a fuertes se favorece el escurrimiento. En tal sentido, se aconseja utilizar aspersores que entreguen menor precipitación comparado a terrenos que presenten una topografía plana.

Cuadro 7. Valores referenciales de distintas intensidades de precipitación máximas para diferentes condiciones de suelo, pendientes y vegetación (mm/h).

Pendiente	0 a 5%		5 a 8%		8 a 12%		> 12%	
	Cobertura vegetal							
Tipo de suelo	con	sin	con	sin	con	sin	con	sin
Arenoso grueso	50	50	50	40	40	25	25	12,5
Arenoso grueso compacto	45	40	30	25	25	20	20	10
Franco arenoso fino	45	25	30	20	25	15	20	10
Franco arenoso fino compacto	30	20	25	12,5	20	10	12,5	10
Franco limoso	25	12,5	20	10	15	7,5	10	5
Franco limoso compacto	15	8	12,5	6	10	4	7,5	2,5
Franco arcilloso o arcilloso	5	4	4	2,5	3	2	2,5	1,5

Fuente: Soil Conservation Services – USA, 1960.

Factores técnicos: el tipo y diámetro de las boquillas determinan el patrón de distribución del agua por parte del aspersor. Lo más típico es que el aspersor tenga dos boquillas con funciones distintas y complementarias al mismo tiempo, donde una distribuye el agua en la zona más cercana a la periferia del círculo de mojamiento y la otra lo hace más cercano a la zona del aspersor. Si el aspersor contiene una sola boquilla ésta debiera cumplir las dos tareas (en general son aspersores de baja presión y menor alcance). Cabe señalar que cada aspersor trabaja dentro de un rango de **presiones de trabajo**

determinando el diámetro de mojado y el tamaño de las gotas. A bajas presiones el chorro de agua se divide en gotas grandes y si se disminuye aún más la presión, la precipitación se concentra cerca del aspersor y en la zona periférica de mojado. Por el contrario, si la presión es alta, se produce la pulverización de las gotas disminuyendo el alcance del chorro de agua, concentrándose la precipitación en la zona del aspersor.

Si bien los marcos de riego pequeños (< a 12 m) tienen un riego más uniforme y necesitan menos presión para funcionar, presentan mayores costos en equipamiento y un mayor traslado de las tuberías en campo. En marcos de riego de mayor distanciamiento (> a 24 m) sería lo contrario. Mientras que en marcos de riego intermedios (entre 12 y 24 m) presentan ventajas de ambos.

Factores económicos: la cobertura del sistema de tuberías dependerá del capital inicial que tenga el agricultor y la disponibilidad de mano de obra. Como referencia, para que el sistema semifijo con laterales móviles sea rentable económicamente, la longitud de los laterales no debe sobrepasar los 200 metros, aunque igualmente conviene hacer un estudio económico pertinente al terreno donde se desea instalar un sistema estacionario de riego por aspersión.

Factores prácticos: algunas consideraciones generales que deben tomarse en cuenta son:

- El fabricante debe entregar la información o datos del comportamiento del aspersor que se elija para cualquier marco de riego.
- Tratar que la precipitación del aspersor sea baja (aprox. entre 5 a 7 mm/h, dependiendo de la textura del suelo), para compensar los problemas causados por el viento. Lo anterior, porque el agricultor tiende a dejar más tiempo las posiciones de riego.
- Regar formando bloques de riego, ya que al disminuir el mojamiento de los bordes de la zona regada se logra una mayor uniformidad de distribución del agua, disminuyendo pérdidas de agua por evaporación (deriva)
- Usar aspersores que trabajen a baja presión (menores a 2 kg/m² o bares) en marcos de riego pequeños (separación entre aspersores menores o iguales a 12 metros) para cultivos frágiles o en áreas con demasiado viento.
- Utilizar aspersores con dos boquillas que funcionan a presiones intermedias (2 a 4 kg/cm² o bares) en marcos de riego de 12 x 12 m a 24 x 24 m para cultivos extensivos e intensivos.

3.3.2.2. Riego por aspersión mecanizados

Los sistemas mecanizados de aspersión que se analizarán con más detalle son el **cañón de riego con carrete y pivote central**. Estos sistemas mecanizados riegan un terreno a medida que se desplazan, por lo que la precipitación no sólo está determinada por el caudal instantáneo, sino además, hay que considerar la velocidad de avance de estos sistemas de desplazamiento continuo.

Cañón de riego con carrete.

Es un sistema de aspersión donde el agua es aplicada en movimiento por medio de un aspersor de gran tamaño (cañón de riego) colocado sobre un carro con ruedas o patín. Éste es arrastrado por una manguera flexible que entrega el agua a presión. La manguera se enrolla automáticamente en un tambor accionado por un flujo de agua a través de un mecanismo de turbina o de fuelle hidráulico (Foto 8). La presión es generada por una bomba centrífuga, la cual puede ser accionada por un motor eléctrico o combustión interna. El riego por carrete requiere poca mano de obra para realizar las posiciones del equipo en terreno, pudiendo regar franjas desde 60 a 120 m de ancho, dependiendo del radio de mojamiento del aspersor y a una distancia de 400 a 500 m de longitud. Este tipo de máquina es adecuado para climas húmedos o semihúmedos, donde se necesita de riegos suplementarios, ya que el consumo de energía y costos de operación son muy altos para usarlo en riegos continuos.



Foto 8. Cañón en funcionamiento cercano al carrete o tambor dispuesto en el predio (OCMIS, 2003).

El sistema consta de un *cañón de riego* que es un aspersor grande giratorio de brazo oscilante o de turbina (Figura 12). Funcionan cubriendo sectores de entre 200 a 220°. Los caudales pueden ser entre 7 y 40 l/s trabajando con presiones desde 4 a 8 bares. El diámetro de la boquilla del aspersor puede variar entre 12 y 40 mm, mientras que el ángulo de descarga del chorro puede ser entre 15 y 32° (recomendable entre 21 y 25°). Ángulos menores presentan poco alcance y los de mayor ángulo pueden ser afectados por el viento. Por último, también existen cañones de riego con ángulo de descarga variable, oscilando entre 15 y 45°. En el Cuadro 8 se presentan los gastos y diámetros de mojado típicos de un aspersor con un ángulo de 24°.

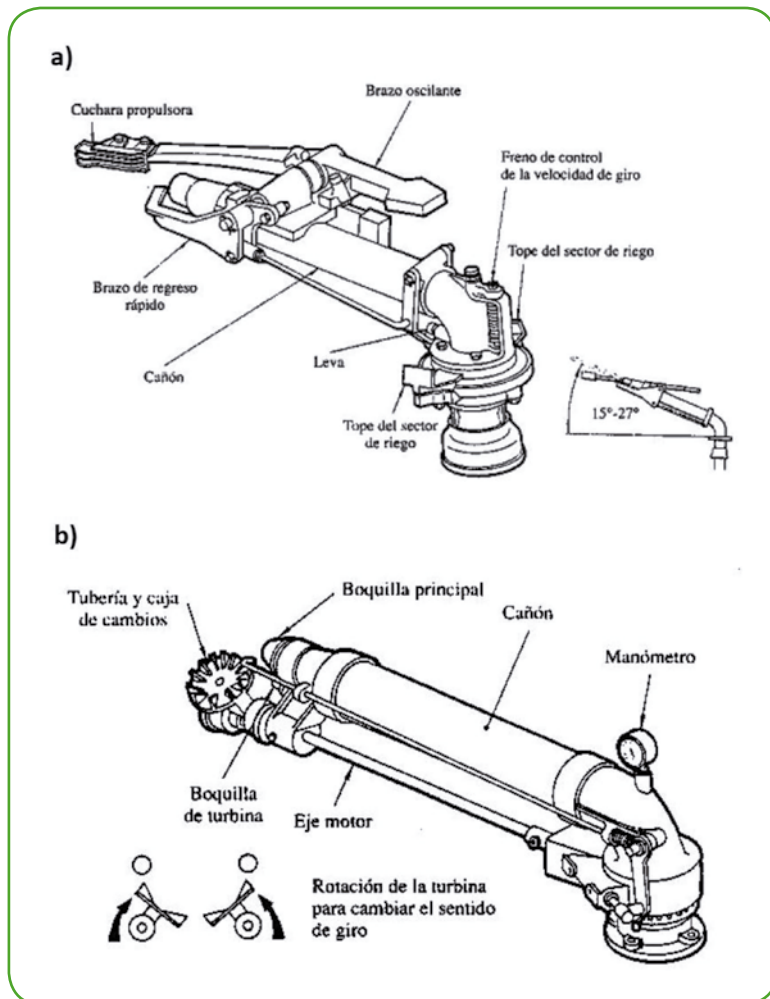


Figura 12. Tipos de cañón de riego en el sistema con carrete. a) cañón de brazo oscilante y b) cañón de turbina.

Cuadro 8. Gastos típicos y diámetros de mojado para cañones con un ángulo de 24°.

Presión por aspersor (m.c.a.)	Diámetro de la boquilla (mm)									
	20,3		25,4		30,4		35,6		40,6	
	Gasto y diámetro de mojado del aspersor									
	l/s	m	l/s	m	l/s	m	l/s	m	l/s	m
42	9,0	86,9	14,2	99,1	20,8	111,3	---	---	---	---
49	9,8	91,4	18,9	103,6	22,4	115,8	30,3	132,6	---	---
56	10,4	94,5	19,6	108,2	24,0	120,4	32,5	138,7	42,6	146,3
63	11,0	97,5	20,2	111,3	25,6	125,0	34,4	143,3	45,1	150,9
70	11,7	100,6	20,8	114,3	26,8	125,0	36,3	146,3	47,6	155,4
77	12,3	103,6	21,5	117,3	28,1	131,1	38,2	149,4	49,8	158,5
84	12,9	106,7	22,1	120,4	29,3	134,1	39,8	152,4	52,1	163,1

Existen dos tipos de boquilla, la telescópica y la de orificio. La boquilla telescópica produce un chorro compacto y un mayor diámetro de mojado, lo que permite un espaciamiento grande entre franjas de riego. La boquilla de orificio produce gotas más pequeñas, adecuado para el riego de cultivos frágiles. Así, por ejemplo, si se desea regar 32 ha (A) cuya evapotranspiración en el mes de máxima demanda (ET_m) es de 5,2 mm/día, la eficiencia de aplicación del sistema es de 75% (E_f) y el tiempo de operación en el día es de 20 horas, el caudal instantáneo (Q_i) por hectárea y el caudal total del equipo (Q_t) se puede determinar utilizando la siguiente expresión:

$$Q_i = 2,77 * \left(\frac{ET_m}{E_f} \right) * \frac{1}{T_o} * \left(\frac{7}{6} \right) = 2,77 * \left(\frac{5,2}{0,75} \right) * \frac{1}{20} * \left(\frac{7}{6} \right) = 1,12 \text{ l/s/ha}$$

$$Q_t = Q_i * A = 1,12 \text{ l/s/ha} * 32 \text{ ha} = 35,8 \text{ l/s}$$

Según el criterio del diseñador y los costos de los equipos, se podrá regar las 32 ha con un carrete cuyo gasto del cañón sea de 35,8 l/s. Siguiendo con el ejemplo, el aspersor seleccionado de acuerdo con el Cuadro 8 para un gasto de 35,8 l/s, tendría un diámetro de boquilla de 35,6 mm, un diámetro de mojado de 145 m, y una presión de operación de 69 m.c.a. (6,9 bares). Por su parte, la intensidad de precipitación media del cañón ($IP_{cañón}$, mm/h) se puede determinar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IP_{cañón} = \frac{Q_a}{0,785 * (D)^2} * 3.600 * \left(\frac{360}{\omega_c} \right) = 12,8 \text{ mm/h}$$

Donde, Q_a es el caudal del cañón (l/s); D es diámetro de mojado (m) y ω_c es el sector del círculo que recibe el agua (grados). Así, el $IP_{cañón}$ para un círculo de mojado hipotético de 220° (ω_c) sería:

$$IP_{cañón} = \frac{35,8}{0,785*(145)^2} * 3.600 * \left(\frac{360}{220}\right) = 12,8 \text{ mm/h}$$

Sin embargo, el espaciamiento entre líneas de recorrido del cañón determina la uniformidad de aplicación del cañón, donde la velocidad del viento es una variable clave que incide en el diámetro de mojamiento del cañón seleccionado. Para cañones con ángulos de trayectoria entre 23 y 25°, se recomienda multiplicar el diámetro nominal de mojado del aspersor por el factor proporcionado en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Factores de ajuste referenciales del diámetro de mojado nominal para diferentes velocidades de viento.

Velocidad del viento (m/s)	0 – 0,9	0,9 - 2,2	2,2 – 4,5	> 4,5
Factor	0,80	0,65 a 0,87	0,55 a 0,60	0,50 a 0,55

Si la velocidad del viento es de 4,5 m/s, el espaciamiento entre líneas de recorrido del cañón (E_r) sería de 87 m ($145*0,6 = 87$ m). Además, si el sentido de marcha del cañón en el campo tiene 700 m (ancho del potrero), el número de franjas a regar será de 8,0 ($700/87$). Por otro lado, la velocidad de avance del cañón (V_c , m/h) depende del caudal del cañón y de la velocidad de desplazamiento del cañón, es decir, de la velocidad de enrollamiento de la manguera en el carrete. Así, considerando una lámina neta de 38 mm lo que daría una lámina bruta (L_b) de 50,7 mm ($38 \text{ mm}/0,75$), el valor de V_c sería de:

$$V_c = \frac{Q_a}{E_r * L_b} * 3.600 * \frac{35,8}{87 * 50,7} * 3.600 = 29,2 \text{ m/h}$$

Otro elemento es la *manguera* que es una tubería que conecta el carro con el cañón de riego y es de polietileno de media densidad. Ésta es capaz de resistir alta presión y la fuerza de tracción generada por el arrastre sobre el suelo. Además, deben ser muy flexibles para enrollarse en el tambor. La longitud y el diámetro de las tuberías dependen del caudal y del diámetro del tambor. En general, la longitud puede variar desde 100 a 500 m o más, mientras que el diámetro puede estar entre 50 y 125 mm. Otro componente es el *tambor enrollador* que es un tambor metálico de diámetro variable que gira a una velocidad predeterminada enrollando la manguera a una velocidad entre 10 y 60 m/h.

La velocidad de enrollado de la manguera determina la magnitud de la lámina de riego. La velocidad de la turbina puede ser modificada a voluntad por el operador del equipo de riego. La energía requerida para el funcionamiento de los carros autopropulsados debe ser generada por un equipo *motobomba* capaz de suplir los requerimientos de presión y caudal. El sistema de bombeo puede ser basado en motores a combustión interna o eléctricos. En el primer caso, las bombas son de tipo centrífugas, de una o más etapas, que funcionan entre 1.400 y 1.850 revoluciones por minuto (r.p.m.) conectada a un motor de alta potencia (4 a 6 cilindros). En este caso el consumo de combustible es elevado (0,3 – 0,4 l/HP/h de operación). En el segundo caso, éstas funcionan a 2.900 r.p.m, pudiéndose poner en serie si la bomba individual no genera la presión suficiente. En cuanto a la *red matriz*, en muchos casos las bombas extraen el agua directamente de acequias o fuentes de agua y la impulsan al carro. Sin embargo, se puede dar que la fuente de agua se encuentre retirada del predio, por lo cual el agua debe ser impulsada a través de tuberías hasta donde se ubica el carrete. Por otro lado, si la red de tuberías va en superficie éstas pueden ser de fierro galvanizado, con uniones de acople rápido e hidrantes. Si la tubería va enterrada, son normalmente de PVC (clase 10).

Un ejemplo real realizado el 2005, mostró que un sistema de riego por carrete probado en terreno (localidad de Pencahue, Región del Maule), con un diámetro de boquilla de 30 mm, presión de trabajo del aspersor de 5 bares, velocidad del viento menor a 2 m/s, y ángulo de descarga y sectorial del aspersor de 24 y 220 grados respectivamente, puede regar franjas con un coeficiente de uniformidad cercano al 90%, para un espaciamiento entre posturas de riego de 85 a 90 metros. Además, el alcance máximo promedio del chorro de agua puede estar entre los 50 y 55 metros para una velocidad del carrete entre 32 y 33 m/h, y una altura de base y extremo del aspersor desde el suelo de 2,1 y 2,3 metros, respectivamente.

Así, si se realizan las pruebas en campo de la descarga del aspersor a diferente presión de trabajo, para un tamaño y tipo de boquilla y eligiendo un adecuado espaciamiento entre las posiciones de riego que asegure el traslape, se puede asegurar una eficacia y eficiencia del equipo de riego a las condiciones específicas de uso en el predio.

Por otro lado, los cañones de riego se adaptan a todo tipo de cultivos, pero hay que tener cuidado con algunas flores y hortalizas, sobre todo durante períodos fenológicos claves como germinación y floración. En este caso, utilizar boquillas de menor tamaño y con una mayor presión, a objeto de disminuir el tamaño de las gotas. Los cultivos que más se adaptan a este sistema suelen ser aquellos que cubren un alto porcentaje del suelo (praderas), estando especialmente indicados para zonas húmedas o semiáridas, donde las lluvias naturales permiten espaciar los riegos, o en donde se necesite cubrir riegos de apoyo. Además, el sistema es muy apropiado para explotaciones que presentan terrenos o predios pequeños e irregulares.

La uniformidad de distribución del agua depende, mayoritariamente, de la variación de la velocidad de avance, de las características propias del aspersor y sus condiciones de trabajo (presión, boquilla y ángulo de descarga), de las condiciones de funcionamiento del equipo de riego (ángulo sectorial a regar y traslape de las bandas regadas), de la distorsión que pueda producirse por la intensidad y dirección del viento. Sin embargo, el sistema se adapta en suelos con débil estructura y permeables (arenosos) o en suelos con baja velocidad de infiltración (textura fina; arcillosos).

Resumiendo, se pueden dar algunas recomendaciones para el buen funcionamiento de este sistema:

a) Un exceso de presión de trabajo provoca una mayor cantidad de gotas pequeñas. Esto conlleva un aumento de la deriva, amplificándose por la acción del viento. La presión de funcionamiento no debe variar más de un 20% en ningún punto del terreno, a fin que el caudal descargado no varíe más de un 10%. Si la variación de presión supera este valor, colocar un regulador de presión en la entrada del aspersor o cañón.

b) El ángulo de descarga más recomendable es entre 21 y 23 grados para tener suficiente alcance y disminuir el efecto del viento. En lugares ventosos (mayor a 4 m/s), usar ángulos de descarga entre 20 y 21 grados. Por otro lado, el ángulo sectorial (entre sectores o posturas) recomendado debiera estar entre 200 y 220°.

c) Los espaciamientos entre posiciones de riego dependen del porcentaje del diámetro de mojado y en función de la velocidad del viento. Algunas referencias se muestran en el Cuadro 9.

Los valores más altos del intervalo de espaciamiento mostrados en el Cuadro 9 equivalen a boquillas cónicas y los valores más bajos a boquillas de anillo. El diámetro de mojado que se considera dependerá de la presión mínima de trabajo obtenida en el predio. El espaciamiento entre posturas se obtiene dividiendo el (los) predio (s) en un número entero de bandas regadas.

d) El desplazamiento del cañón de riego debe orientarse perpendicular a los vientos predominantes para disminuir la distorsión que producen.

e) La uniformidad del riego, a través del coeficiente de uniformidad (CU), y la eficiencia de aplicación (E_a) se pueden alcanzar con un buen diseño y manejo, teniendo en cuenta la velocidad del viento (Cuadro 10).

Cuadro 10. Valores referenciales del coeficiente de uniformidad y eficiencia de aplicación en función de la velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Coeficiente uniformidad (%)	Eficiencia de aplicación (%)
0 - 2	82	77
2 - 4	70	65

Fuente: adaptado de Simpfendörfer, 2001.

f) Al regar terrenos con mayor pendiente, es recomendable que el cañón se desplace en sentido de la pendiente para que el escurrimiento se produzca en el suelo seco.

g) Si en el lugar que se desea regar existe una torre con líneas eléctricas de alta tensión, es recomendable que el cañón de riego se coloque a una distancia mínima de 30 metros, observando que en ningún caso el chorro de agua alcance esas líneas.

Pivote central

El pivote central es una máquina que rota alrededor de un extremo fijo (punto pivote), constituida por una estructura metálica que soporta las tuberías con los aspersores y tensores. Este sistema presenta un mecanismo de avance automático, con alimentación de agua continua, que permite regar estando la máquina en movimiento (Foto 9). En el “punto pivote o estructura base” es por donde ingresa el agua y pasa la energía eléctrica que abastece toda la estructura del pivote, regulada a través de un tablero de control. Además, el “**punto pivote**” es la estructura base que sostiene tanto la tubería vertical como la unión donde va conectada la tubería principal, uniendo todos los tramos del pivote y permitiendo que éste gire.



Foto 9. Pivote central (López-Olivari, 2014).

La tubería principal o lateral del pivote se sostiene a través de varios tensores de acero y torres que se encuentran espaciadas entre 30 y 60 metros una de otra. El conjunto de tensores, tuberías y aspersores entre una torre y otra es denominado **“tramo”** (Foto 10). Cada torre sostenida entre 2 o 4 ruedas cuenta con un motor, tensores, caja eléctrica y acoples flexibles para conectar las tuberías de dos tramos contiguos (Foto 11). El largo máximo de los tramos de un pivote dependen del tamaño y espesor de la tubería, de la pendiente y topografía del terreno. De esta manera, el largo de los tramos no necesariamente deben ser uniformes, y por lo general, varían para adecuarse a las condiciones y dimensiones del terreno o para ajustar la altura de los aspersores en donde existen terrenos ondulados o con pendiente. Todos los tramos que componen el pivote, se deben mantener alineados y se hace a través de unos sensores que están sobre el sistema motriz, los cuales al detectar una desalineación de la máquina detienen el funcionamiento de la estructura. Además, la superficie regada tiene forma circular, por lo que al final del lateral o tubería principal se le puede agregar un **“voladizo”**. Es decir, una tubería de menor diámetro con aspersores, sostenida desde la última torre por cables y tensores para aumentar el radio de mojado (Foto 12). Ésta entra en funcionamiento, sólo cuando la máquina llega a una esquina del predio sin regar. Por lo general, la longitud más común de los pivotes es de 400 metros y dependerá del tamaño del predio. Por ejemplo, la superficie de mojamiento en el suelo o cultivo por un tramo de 30 m del pivote central sería cercana a los 2.827 m².



Foto 10. Un “tramo” de un pivote con sus tensores, tuberías y aspersores (López-Olivari, 2014).



Foto 11. Unidad de soporte o torre de un pivote (López-Olivari, 2014).



Foto 12. Voladizo o tramo suspendido (López-Olivari, 2014).

La torre que se encuentra más alejada del punto pivote, es la que controla el movimiento completo de la máquina. La velocidad media de dicha torre es regulada por un panel de control que guía el sistema completo. Por otro lado, que cada torre del pivote se detenga o vuelva a moverse para mantenerse alineadas no afecta la aplicación uniforme del agua. La vida útil es de aproximadamente 15 a 20 años según la mantención del sistema.

En relación a los “*aspersores*” hay dos tipos que son de impacto y en spray (Figura 13 y Cuadro 11). En el mercado existen un sinnúmero de tipos y configuraciones de aspersores, los cuales se diferencian según su volumen aplicado en el tiempo, diámetro de mojado, presión requerida y costo. Así, la selección debe orientarse a minimizar la dimensión de la bomba y, por consiguiente, el costo de operación. La lámina de agua aplicada por los aspersores tiene que ser de manera uniforme para evitar la pérdida de agua por escorrentía superficial y satisfacer los requerimientos de riego. Para cumplir estas condiciones se requiere considerar la disponibilidad de flujo, tamaño del pivote central, tipo de suelo (textura y velocidad de infiltración), clima (evapotranspiración y viento) y los requerimientos hídricos de los cultivos.



Figura 13. Diferentes tipos de emisores utilizados en pivotes centrales. (a) i-Wob (boquilla de tambaleo); (b) Difusor LDN (boquilla de baja deriva); (c) LEPA (boquilla de precisión de baja energía); (d) Super spray (boquilla difusora) y (e) Pivot máster (aspersor de impacto) (fuente: modificado de Senninger, 2005).

Cuadro 11. Radios de cobertura y espaciamiento referenciales generalmente utilizados para diferentes tipos de aspersores.

Tipo de aspersor	Presión (bares)	Radio de cobertura (m)	Espaciamiento (m)
Wobblers	0,69 - 1,38	4,5 - 9,1	4,6 - 6,1
Difusor LDN	0,41 - 1,38	2,6 - 8,4	3,0
Pivot Master	2,0 - 4,1	11,1 - 14,1	2,0 - 10
Super spray	0,41 - 2,76	2,3 - 5,3	3,0 - 3,4
Rociadores	1,7 - 2,4	5,0	1,5 - 3,0

La superficie regada por el equipo puede ser ampliada adicionando un cañón al final del último tramo del pivote de alto caudal y a costo relativamente bajo. Si este cañón final va montado sobre un pivote de 400 m podría regar eficazmente hasta unas 8 ha o más. Éste al ser de alta presión, debiera incorporar una bomba al final del lateral para entregar la presión necesaria al cañón, entrando sólo en operación cuando se programe su funcionamiento. La profundidad de la aplicación de agua que produce el cañón disminuye con la distancia, pudiendo provocar un estrés hídrico severo en los bordes

del terreno. Adicionalmente, existen los “sistemas esquinas”, estructuras especiales, de alto costo, que permiten regar aquellas áreas en donde el pivote no alcanza a mojar, formando una figura cuadrada más que una circular.

Así, en suelos arenosos (media a alta infiltración) se pueden usar aspersores de alta tasa de aplicación como son el difusor LDN y Super spray, mientras que para suelos más pesados como los arcillosos (baja infiltración) debieran usarse, por ejemplo, aspersores del tipo Wobblers. Sin embargo, un caso especial son los aspersores LEPA (Aplicación de Precisión de baja Energía), que presentan tuberías bajantes desde el lateral a cada metro, extendiéndose hasta la superficie del suelo, donde un emisor de baja presión reemplaza al aspersor. El agua es aplicada directamente a un surco y las pérdidas por evaporación se minimizan ya que la parte aérea de las plantas no se moja. El cultivo es sembrado o plantado en círculo para que los bajantes no dañen las plantas. Así, para evitar el escurrimiento superficial se realizan prácticas de manejo en la construcción de los surcos que facilitan el almacenamiento superficial del agua retardando el escurrimiento superficial (Foto 13).



Foto 13. Aplicación de agua de riego en los surcos usando el sistema LEPA (Fuente: Senninger, 2005)

Por otro lado, los pivotes centrales utilizados en áreas con importantes cambios topográficos o de presión, requieren el uso de “**reguladores de presión**” en cada uno de los aspersores del sistema para evitar fluctuaciones de caudal en los aspersores y tramos (Figura 14). Por lo general, estos reguladores mantienen presiones de salidas constantes entre 0,41 a 3,45 bares (6 a 50 psi) de acuerdo a la presión de trabajo del aspersor.

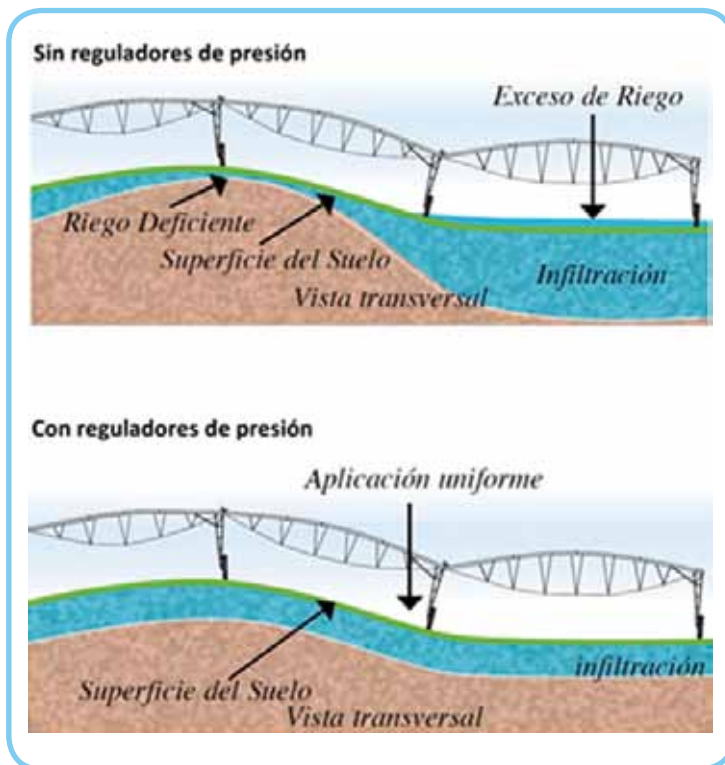


Figura 14. Diferencias en el patrón de mojado del pivote central usando reguladores de presión (Senninger, 2005).

El riego con pivote central se adapta a todo tipo de cultivos, menos aquellos que por la altura impiden el paso de la máquina. Las características ideales de este sistema son para predios grandes (≥ 30 ha), suelos de textura permeables y de topografía plana. La decisión final de optar o adquirir uno de estos sistemas de riego se debe realizar después de analizar económicamente los beneficios y costos del proyecto. Es necesario indicar que recientemente han hecho su aparición al mercado minipivotes, que permiten regar superficies inferiores a 30 hectáreas a precios razonables. La eficiencia de aplicación del agua de estos equipos alcanza valores entre el 80 y 85%.

Los pivotes riegan en círculo, por lo que las torres externas deben realizar un mayor recorrido que las torres internas. De esta forma, frente a tramos de igual longitud, los más externos riegan una mayor superficie que los internos. Cerca del 75% del área regada se encuentra en la mitad externa del radio del pivote (Figura 15). Por ello el manejo y la operación del sistema se enfocan a las torres externas. La torre más alejada del punto de pivote controla el movimiento de la máquina. A su vez, el tiempo de rotación mínimo del pivote es aproximadamente entre 14 y 20 horas (2-3 m/min en la torre final). Sin embargo, en cada torre se pueden instalar cajas reductoras para aumentar la velocidad reduciendo el tiempo de rotación a menos de 12 horas (4,3 m/min en la torre final).

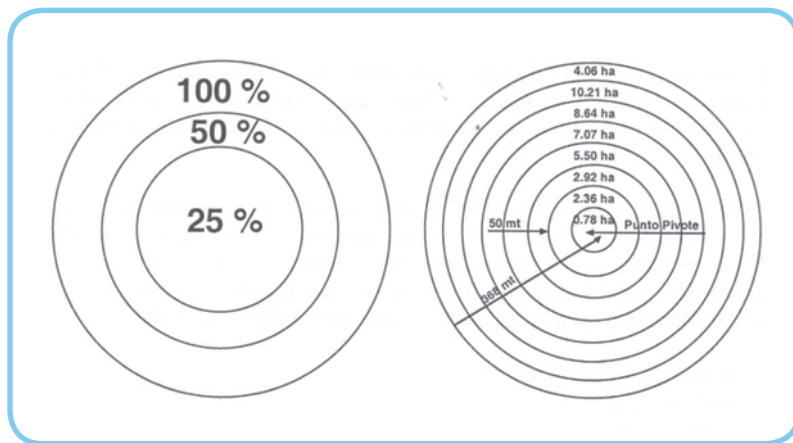


Figura 15. Área mojada en diferentes tramos desde el centro al extremo del pivote central.

El panel de control regula la velocidad media de la última torre, que actúa como guía para el sistema completo. Esta torre funciona a un cierto porcentaje de tiempo por cada minuto, por ejemplo, si el temporizador está a un 100% significa que la máquina avanza de manera continua a máxima velocidad. Si avanza al 50%, la última torre se mueve a la mitad de su velocidad máxima (estará en funcionamiento durante 30 segundos por cada minuto que pasa, aplicando el doble de la cantidad de agua). La velocidad de rotación está estrechamente asociada a la lámina de riego que se quiere aplicar. A mayor velocidad de avance de la última torre, menor es la magnitud de la lámina de agua aplicada, y viceversa.

Dado que los tramos finales cubren una mayor superficie y avanzan a una mayor velocidad que los tramos interiores, para mantener una lámina de riego pareja a lo largo del lateral, los aspersores deben ir aumentando su caudal a medida que se alejan del punto central del pivote. Esto implica que la intensidad de precipitación va aumentando llegando a un máximo en la última torre (Gráfico 9a). Lo anterior, puede llegar a ser un problema en suelos de muy baja velocidad de infiltración (arcillosos) o en terrenos

con mayor pendiente (lomajes). Una forma de disminuir la intensidad de precipitación es seleccionar, para los últimos tramos, boquillas o aspersores que mojen un mayor diámetro para aumentar el área mojada. Otra forma de evitar esto es disminuyendo la longitud del pivote, lo que implica regar una menor superficie o tener más de una máquina para regar la misma área. También, existe la posibilidad de realizar prácticas de manejo del suelo que favorezcan la infiltración y eviten o reduzcan el escurrimiento superficial (subsolar, incorporar rastros, entre otros). Incluso, en Estados Unidos, se cultiva con surcos en los cuales se le construyen tacos cada cierta distancia para aumentar la capacidad de almacenamiento superficial. En algunos casos esta intensidad de precipitación puede sobrepasar la velocidad de infiltración del suelo, provocando, potencialmente, la acumulación de agua en superficie. Una alternativa para disminuir o evitar el escurrimiento superficial, es aumentar la velocidad de rotación de la máquina, de tal manera de poder aplicar láminas pequeñas de agua y aprovechar la parte alta de la curva de la velocidad de infiltración (Gráfico 9b).

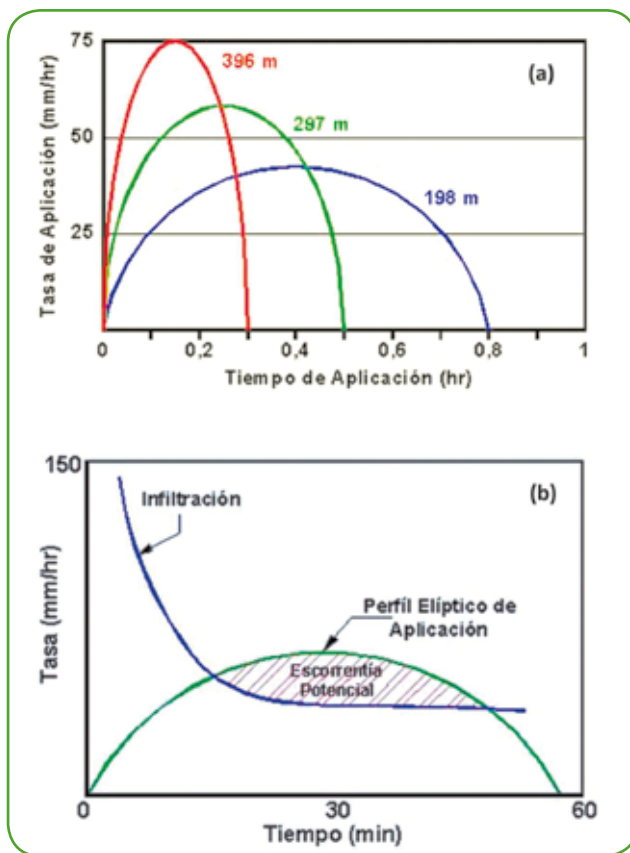


Gráfico 9: Tasas de aplicación de agua a diferentes distancias desde el punto pivote (a) e interacción entre velocidad de infiltración y tasa de aplicación de agua (b). La zona achurada es el agua que el suelo no es capaz de infiltrar (potencial escurrimiento).

Por otra parte, es necesario considerar que el suelo tiene una cierta capacidad de almacenamiento de agua superficial, que depende entre otras cosas de la pendiente del terreno, por lo cual el escurrimiento se producirá solo si se supera esta capacidad de almacenamiento. Algunos valores referenciales de la capacidad de almacenamiento que presentan los suelos en función de la pendiente del terreno se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Valores referenciales de la capacidad de almacenamiento de agua superficial en función de la pendiente del terreno (Shockley, 1968).

Pendiente (%)	Almacenamiento Superficial Permisible (mm)
0 - 1	12,7
1 - 3	7,6
3 - 5	2,5
> 5	0,0

La topografía del terreno presente en los predios (plano en curvas de nivel) es una información relevante y necesaria para poder conocer los desniveles máximos que presentaría este tipo de equipos entre los extremos del pivote y la cota de la fuente de agua. Es necesario indicar que, normalmente estos antecedentes básicos son entregados a las empresas fabricantes, para que ellos envíen la máquina de riego adecuada a los requerimientos solicitados. Así, de acuerdo a las características de tamaño y forma del predio se define la ubicación del punto pivote y longitud total de los tramos de la máquina (incluye la longitud del pivote hasta la última torre más el voladizo o alcance del cañón final si existiera). Por ejemplo, con esta información el área regada por un pivote puede ser determinado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A = \frac{\pi * (L_p + R)^2}{10.000}$$

Donde:

- A = Área regada (ha)
- L_p = Longitud total del pivote (m)
- R = Alcance del cañón final o largo del voladizo (m)

Así, si se decide colocar un pivote en el punto central de un potrero, con una longitud total de la máquina de 425 m (400 m a la última torre más 25 m de voladizo), el área regada por el pivote será de 56,7 hectáreas. Además, el caudal requerido por un aspersor dado (Q_a en l/min) a cualquier distancia del punto pivote, se puede determinar de la siguiente manera:

$$Q_a = \frac{L_d * Q_p * L_e}{A = 95,5}$$

Donde:

- L_d : Distancia hasta el aspersor desde el punto pivote (m)
- Q_p : Caudal del pivote (m³/h)
- L_e : Espaciamiento entre aspersores (m)
- A : Área regada por el pivote (ha)

Así, si el aspersor está situado a 150 m del punto pivote, el espaciamiento entre aspersores es de 5 m, el área regada es de 56,7 hectáreas y el caudal total del sistema es de 200 m³/h, el caudal requerido para ese aspersor sería de 27,7 l/min.

Otro punto importante a considerar son las pruebas en campo de la descarga de los aspersores a lo largo de todo el pivote a la presión de trabajo que se establezca (Figura 16). Si bien los caudales de los aspersores aparecen en los catálogos, ésta es una descarga nominal, por lo que el caudal que tendría un aspersor en la práctica no necesariamente será la misma que aparece en el catálogo porque existen otros elementos que pueden potencialmente alterar esa descarga antes que llegue al suelo (velocidad del viento, pendiente, entre otras). Esta información es útil para conocer la uniformidad de distribución del agua a lo largo del pivote. Con ello se busca asegurar una eficacia y eficiencia del equipo de riego a las condiciones específicas de uso en el predio.

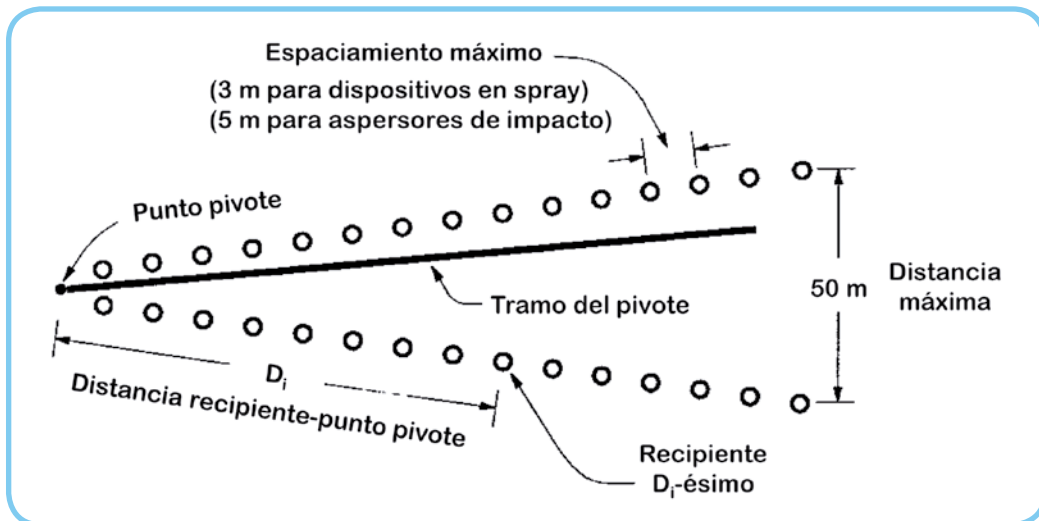


Figura 16. Diseño de la ubicación de los recipientes para la determinación de la distribución de agua para un equipo de riego pivote central (modificado de ASAE Standards, 2001).

Por último, a continuación se detallan algunas consideraciones generales respecto a ventajas y desventajas que presenta el sistema de pivote central.

El pivote central presenta las siguientes ventajas:

- 1.- Debido a que las dosis de riego es únicamente función de la velocidad de rotación, puede adaptarse tanto a dosis grandes como pequeñas.
- 2.- El poder modificar la pluviometría permite al sistema adaptarse a distintos tipos de suelos.
- 3.- El sistema permite realizar riegos de alta uniformidad.
- 4.- No necesita nivelación de suelos, adaptándose a topografías onduladas. Esto permite conservar la fertilidad natural del suelo.
- 5.- Evita la construcción de acequias y canales, aumentando la superficie útil.
- 6.- Puede conseguir altos grados de automatización, con el consiguiente ahorro de mano de obra.
- 7.- Posee un bajo costo de inversión por hectárea.
- 8.- Bajos costos de operación.
- 9.- El sistema trabaja a bajas presiones, permitiendo menores requerimientos de energía.
- 10.- Permite una rotación de cultivos, con la condición que el dimensionamiento se realice para el cultivo más exigente.
- 11.- Permite la aplicación de químicos junto con el agua de riego.

Sin embargo, las desventajas del sistema de pivote central son los siguientes:

- 1.- Alta inversión inicial.
- 2.- Requiere de un servicio técnico especializado.
- 3.- Se necesitan adaptar los predios para su funcionamiento (mover cercos, realizar nuevos trazados de líneas eléctricas, eliminar árboles, modificar caminos, otros).
- 4.- Al ser un sistema de riego circular se pueden perder las superficies en las esquinas de los predios.
- 5.- Para un buen manejo del riego y la presencia de varios cultivos bajo el pivote, el sistema obliga a cultivar en sectores circulares.
- 6.- La uniformidad de riego se ve afectada por la influencia de fuertes vientos.
- 7.- Requiere de sistemas de decantación y filtraje cuando se presentan problemas con la calidad del agua.

Sistema de riego K-Line

El riego por aspersión “K-Line” es un sistema que fue diseñado principalmente para ser usado en pastos y cultivos forrajeros. Es un sistema práctico y relativamente simple el cual permitiría reducir el tiempo y el costo de instalación, operación y reparación comparado a otros sistemas de riego por aspersión. Este sistema podría operar mientras el ganado se encuentra pastando y cada cambio de postura de las tuberías (traslado de tuberías) puede ser de forma rápida utilizando una moto de cuatro ruedas u otro vehículo (Foto 14). La estructura consiste en una serie de tazones unidos por una tubería de polietileno fuerte y flexible resistente al enrollamiento, congelación, radiación ultra violeta (UV) y a los roses por el continuo movimiento del sistema K-Line.

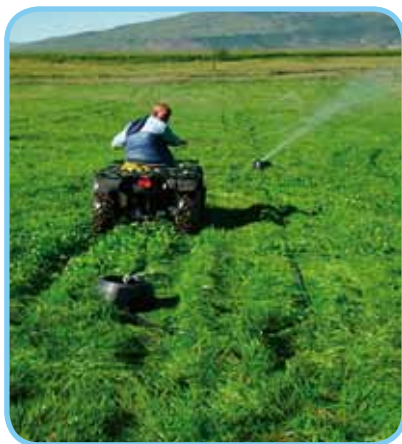


Foto 14. Traslado de las tuberías K-Line en funcionamiento por medio de una moto de cuatro ruedas (Fuente: Cooprinsem, 2016).

Los componentes del sistema K-Line son:

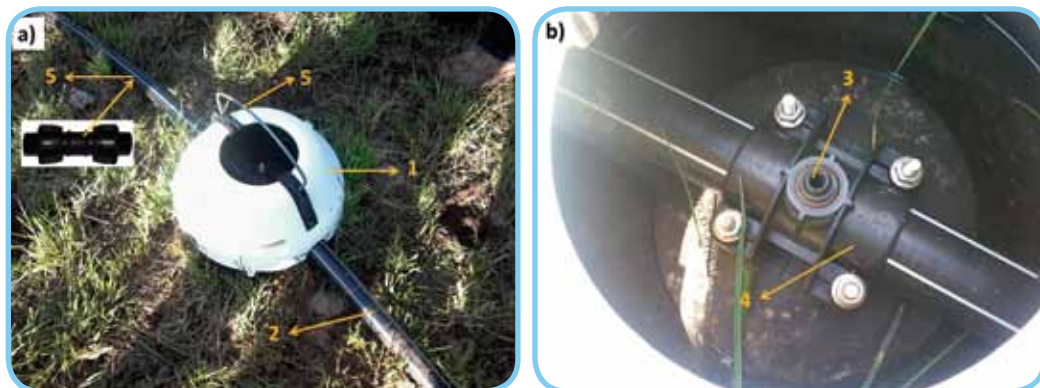


Foto 15. Componentes del sistema de riego por aspersión K-Line (foto a y b). Cada componente está descrito en el texto del documento según numeración. (Fuente: López-Olivari, 2016)

1) Tazones K-line: es un tazón sólido hecho de polietileno resistente a la abrasión por la radiación ultra violeta (UV), a los impactos por el movimiento o traslado. La base del tazón es relativamente pesada y de muy bajo centro de gravedad por lo que ayuda a mantener el tazón estable durante el traslado.

2) Tubería K-Line: Polietileno de baja densidad y la tubería es muy fuerte permaneciendo flexible. Las rayas en la tubería de K-line ayudan al instalador a reconocer e impedir que la tubería se enrosque durante la instalación. Además, la tubería es resistente a la abrasión por la radiación ultra violeta (UV), a los impactos por el movimiento o traslado y las tensiones ejercidas durante el traslado en campo.

3) Aspersores: los aspersores que se pueden utilizar son los de impacto y rotatorios con una amplia variedad de boquillas para ajustar las tasas de aplicación.

4) Collarín: el collarín es de acero inoxidable o plástico duro ubicado dentro del tazón lo que permite una fuerte y resistente unión entre el aspersor-tazón-tubería.

5) Accesorios: las uniones son materiales sólidos muy resistentes y duraderos al impacto. Además, sobre los tazones es posible colocarle un gancho de metal que impediría que el ganado se acerque a beber agua cerca del aspersor o rampa el aspersor.

6) Hidrante: el hidrante es la toma de agua diseñada para proporcionar un caudal determinado para alimentar la red de distribución del sistema de riego por aspersión K-Line. Sin embargo, éste puede ser alimentado a través de una motobomba o bomba.

El sistema K-line presenta las principales ventajas (© K-Line North America, 2016):

- El sistema es de bajo costo comparado a los usados en praderas.
- La instalación en el predio es simple.
- Las posturas en el campo del sistema son de fácil operación.
- Se adapta en predios planos o con pendiente.
- El sistema puede ser fácilmente ampliable en superficie.
- Uso eficiente del agua disponible.
- Bajas tasas de aplicación de agua (promedio de 2 a 5 mm/h dependiendo del tamaño de la boquilla).
- Bajos requerimientos de presión (2,5 a 3,5 bares)
- Posibilidad de regar desde 0,5 a 400 ha.

A continuación se presenta un ejemplo referencial de un cambio de postura del sistema K-Line para una superficie aproximada de 0,8 ha (80 x 100 m) usando un hidrante al medio del terreno o predio:

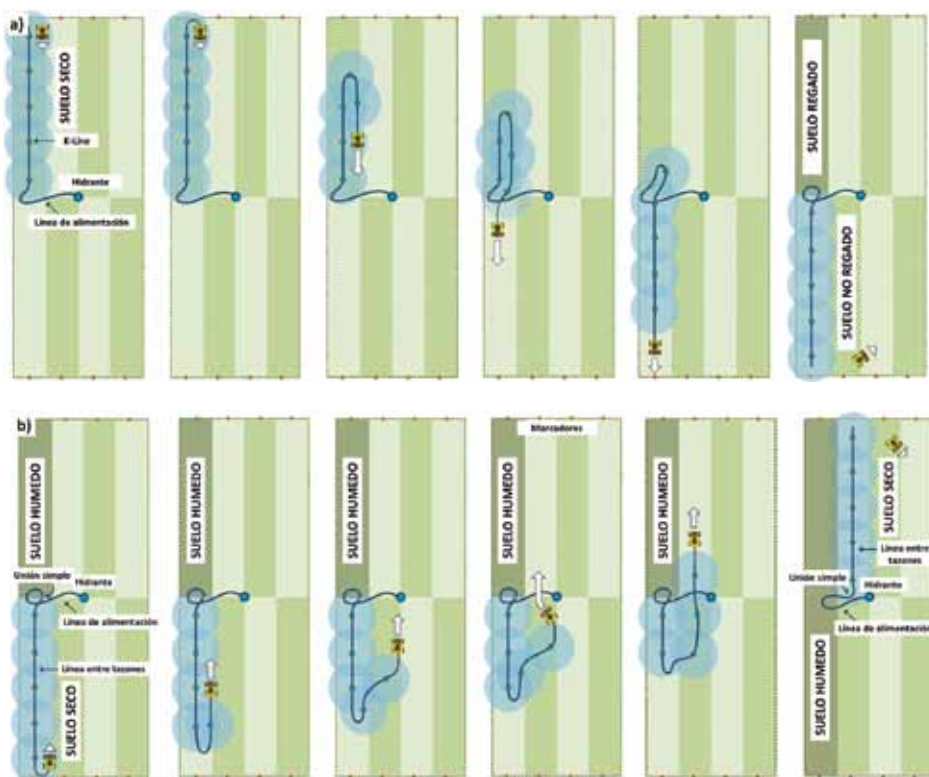


Figura 17. Esquema referencial del cambio de postura móvil del sistema K-Line en el predio (a y b). (Fuente: modificado de © K-Line North América, 2016).

3.3.3. De alta frecuencia

El riego localizado de alta frecuencia (RLAF) se puede clasificar en dos grupos de acuerdo al caudal del emisor o por metro lineal del mismo (Cuadro 13). El caudal límite para hacer esta separación es de 16 L/h, establecido por las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO).

Cuadro 13. Clasificación de los RLAF de acuerdo al caudal.

RLAF	Caudales (L/h)	Tipo de riego	Eficiencia de aplicación (%)
	Alto caudal (16 - 150)	Microaspersión Difusión	Cercano al 85
	Bajo caudal (< 16)	Goteo	Cercano al 90

Fuente: adaptado de Pizarro (1996).

Los sistemas RLAF consisten en humedecer sólo una parte del volumen del suelo, donde se encuentra la zona efectiva de raíces. La idea es que éstas últimas puedan obtener el agua y nutrientes que necesitan (concepto de localizado). Así, al mojar menos suelo se necesita operarlos con mayor frecuencia con el objetivo de mantener el suelo “constantemente” a una humedad apropiada (concepto de alta frecuencia).

3.3.3.1. Goteros o líneas de goteo

Los RLAF de “bajo caudal”, llamado *riego por goteo* (incluye el riego por exudación, microtubos, mangueras de riego y cinta, entre otras), es un sistema de riego a presión que permite aplicar el agua gota a gota. Dicho sistema no moja toda el área del suelo y las raíces de las plantas crecen, concentrándose en la zona de mayor humedad (Foto 16).



Foto 16. Línea de riego con gotero incorporado (2,1 L/h) en un huerto de olivos (López-Olivari, 2014).

Al aplicar el agua de riego en las cercanías de la planta se modifican algunas características de la relación suelo, agua y planta:

a) Pérdidas de agua desde el suelo: en un cultivo, hortaliza o huerto frutal, el agua se pierde a la atmósfera por la suma de la evaporación de ésta desde el suelo y la transpiración desde las plantas (sembradas o plantadas en hilera). En el riego por goteo o cinta se moja la hilera del cultivo, hortaliza o frutal que es una parte de la superficie total del suelo, donde las pérdidas de agua por evaporación son mucho menores que en aquellos sistemas que mojan toda la superficie del suelo. Sin embargo, las pérdidas producidas por transpiración pueden incrementar en el riego por goteo o cinta, ya que el suelo seco se calienta más que un suelo húmedo, provocando un aumento directo e indirecto de la temperatura del follaje. Lo anterior es relevante en árboles frutales de poca edad y siembras de cultivos u hortalizas de baja altura.

b) Distribución del sistema radicular: dado que el riego por goteo o cinta es localizado se humedece sólo una porción del suelo, casi forzando a las raíces de la planta a permanecer en la zona húmeda del suelo (Figura 18). Pero, ¿qué volumen de suelo necesitan las plantas?. Muchos trabajos de investigación en este tema han demostrado y confirmado que las plantas necesitan un volumen de suelo muy inferior al que normalmente pueden explorar en secano o usando otros sistemas de riego. Lo anterior, debido a que las raíces presentan un extraordinario dinamismo, plasticidad y rápida adaptación al régimen de humedad concentrada en el bulbo húmedo. Éste puede contener una densidad de raíces de 3 a 4 veces más que en un suelo con riego no localizado.

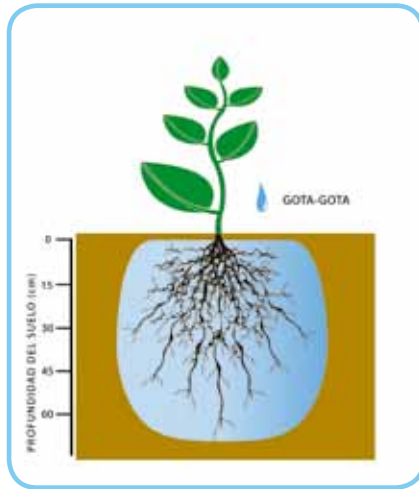


Figura 18. Distribución de las raíces en un sistema de riego por goteo en una planta (López-Olivari, 2014).

c) Bulbo húmedo: es el volumen de suelo humedecido por un gotero, donde el movimiento del agua establece la forma y tamaño del bulbo húmedo, y es el lugar en la cual se desarrolla, mayoritariamente, el sistema radicular de las plantas (Foto 17). El movimiento del agua en el suelo se realiza en todas direcciones, dependiendo de los poros que existen en el suelo. En los poros grandes el agua se mueve casi por gravedad, mientras que en poros pequeños el agua se mueve por capilaridad en todas las direcciones.

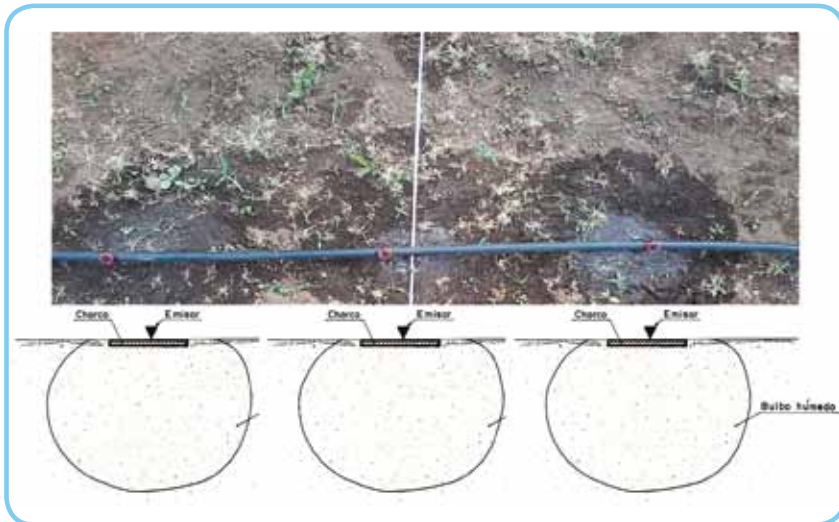


Foto 17. Esquema del bulbo húmedo de un gotero de 2 L/h espaciados a 33 cm para un suelo de textura franca (Datos propios INIA-Carillanca, 2014).

El tamaño y forma del bulbo húmedo dependerá de varios factores, de los cuales se ahondará en textura de suelo, caudal del gotero, tiempo de riego y aireación del suelo:

Textura del suelo: el tipo de suelo juega un rol muy importante para saber cómo puede ser la forma y tamaño del bulbo. En este contexto, en suelos arenosos las partículas son más gruesas y el agua se mueve con mayor facilidad hacia abajo. Así, la forma del bulbo húmedo es más bien en profundidad y el tamaño dependerá del tiempo que tenga el gotero funcionando en ese suelo. Sin embargo, para un suelo arcilloso las partículas son más bien finas, donde el movimiento del agua es de manera lateral más que en profundidad. Esto conlleva a que la forma del bulbo húmedo no sea tanto en profundidad, sino también de modo lateral. Si combinamos estos dos tipos de suelo tendremos un suelo franco de partículas mixtas entre gruesas, medias y pequeñas, por lo que el bulbo húmedo tendrá la forma y características de ambos (principal tipo de suelo en la zona sur de Chile). La Figura 19 muestra de manera esquemática como vería la forma de un bulbo húmedo bajo un sistema riego por goteo.

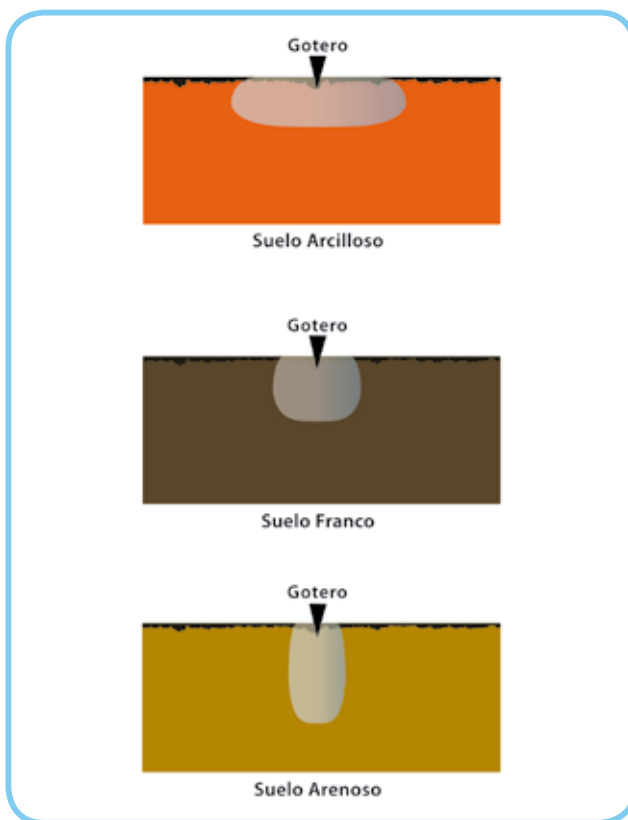


Figura 19. Esquemas de tres diferentes formas de bulbo húmedo dependiendo de la textura del suelo (la misma cantidad de agua aplicada). (López-Olivari, 2014).

Estas formas del bulbo húmedo en tres suelos diferentes nos ayudan a tener una primera aproximación de cuántos goteros se podrían colocar en la sobre hilera para tener un traslape correcto. Un problema que se presenta en el riego por goteo o cinta, es la reducida extensión del bulbo húmedo en suelos arenosos, que ha ocasionado la evolución del riego por goteo hacia un riego por microaspersión, incrementando el diámetro de mojado y por ende del bulbo húmedo.

Caudal del gotero y tiempo de riego: en general, cuando el agua empieza a salir del gotero se forma un pequeño charco a medida que el suelo empieza a absorber agua en toda la superficie del mismo. La Figura 20 muestra cómo varía la forma y tamaño del bulbo húmedo en dos suelos distintos y aplicando la misma cantidad de agua con goteros de diferente caudal. Así, en un suelo arenoso, con un gotero de bajo caudal (4 L/h) la forma del bulbo húmedo tiende a ser de manera vertical, mientras que utilizando un gotero de alto caudal (20 L/h) la forma del bulbo húmedo tiende a ser de manera horizontal y vertical. Por el contrario, si el suelo es arcilloso o franco, la forma del bulbo húmedo para un gotero de bajo caudal (4 L/h) tiende a ser horizontal y vertical. Usando un gotero de alto caudal (20 L/h) la forma que puede tener el bulbo definitivamente es más horizontal, ya que el suelo recibe más agua de la que éste puede infiltrar, generándose un desplazamiento hacia los lados del gotero.

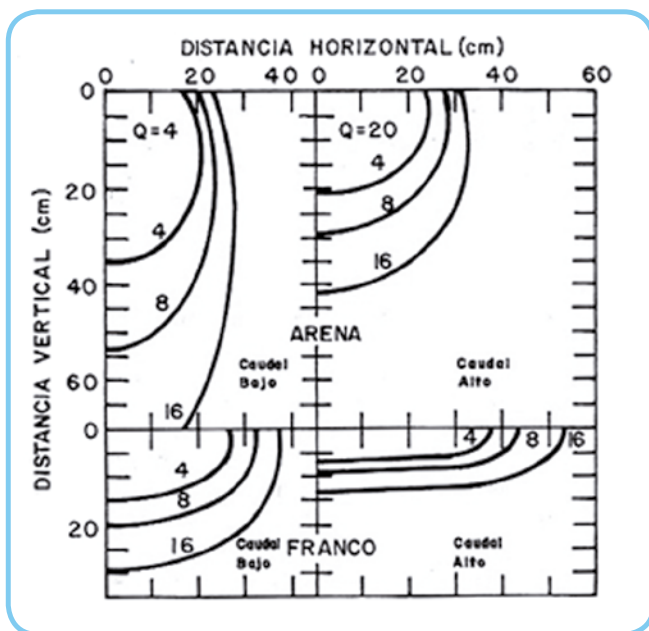


Figura 20. Bulbo húmedo para dos tipos de suelo en función del caudal del gotero y tiempo de riego (Pizarro, 1996).

d) Aireación del suelo: los sistemas de riego gravitacionales y de baja frecuencia (aspersión), suelen usar dosis muy altas de agua de riego, donde el suelo queda saturado de humedad, sobre todo en suelos arcillosos, bajando la aireación del mismo. Además, bajo un sistema de riego localizado (goteo), sólo se satura una porción o volumen de suelo cercano al gotero, presentando también problemas de aireación cuando los riegos son frecuentes (diarios y/o excesivos) en suelos con una alta capacidad de retención de agua (Holtzapfel et al., 2004). Esta zona saturada reduce la capacidad de absorción de la raíz y produce también el desarrollo de musgos en el camellón (Foto 18) afectando potencialmente el rendimiento final. Para mejorar esta condición se recomienda distanciar la aplicación del agua de riego (día por medio o cada dos días), dependiendo de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica existente en ese suelo.



Foto 18. Desarrollo de musgo en un camellón por riegos frecuentes y excesivos en arándano (López-Olivari, 2016).

Para el caso de hortalizas al aire libre e invernaderos de baja superficie (< 1 ha) se pueden utilizar una o doble línea de cintas de riego, según el caso, lo cual permite una aplicación focalizada y más uniforme del agua de riego, espaciando cada orificio de la línea cada 20 o 30 cm, dependiendo de la distancia de siembra de los cultivos.

En la Foto 19 se muestran algunos ejemplos de estos sistemas en lechuga (una línea) y poroto (doble línea) cerca de la localidad de Máfil (Región de Los Ríos) y Río Bueno (Región de Los Lagos). Además, se muestran hileras de frutilla usando doble línea de cinta por presentar dos corridas de frutillas por camellón (imagen más grande).



Foto 19. Riego por cinta en las localidades de Máfil (Región de Los Ríos) y Río Bueno (Región de Los Lagos). a) poroto (doble línea); b) lechuga (una línea) y c) frutilla (doble línea). (López-Olivari, 2014).

Por su parte, bastantes especies frutales se están regando bajo un sistema de riego por goteo en la zona sur de Chile, por lo que hay que tener ciertas consideraciones básicas de manejo. En general los principales frutales plantados (arándanos, cerezos, manzanos y avellano europeo) se adaptan muy bien al sistema de riego por goteo, colocando una o doble línea de goteros sobre la hilera de plantación. Así, la doble línea de goteros podría lograr una mayor distribución de la humedad sobre el camellón, evitando excesos de humedad en las zonas cercanas al gotero y pudiendo reducir en algunos casos el tiempo de riego. Por ejemplo, en arándanos, es aconsejable usar goteros cuyo caudal fluctúe entre 2 a 4 l/h en función del número de goteros por planta y de la textura de suelo. Así, se puede aumentar el caudal del gotero en suelos de textura más arcillosa (menor número de goteros) y reducir el caudal del gotero en suelos de textura más arenosa (mayor número de goteros). También, hay que considerar el volumen de suelo que se debe mojar en la zona de plantación que para el caso del arándano debe fluctuar entre un 40 y 70%. El valor máximo se puede lograr con un sistema de microaspersión, microjet o doble línea de goteros (Ferreyra y Sellés, 2013).

Se recomienda que la distancia de los goteros en la línea estén entre los 30 y 50 cm unos de otros, para humedecer el camellón completo, ya que la profundidad efectiva de las raíces se sitúa principalmente en los primeros 50 cm. Para el caso de cerezos, el uso de línea de goteros es el más recomendable debido a que este cultivo es susceptible al ataque de patógenos cercano al tronco, facilitando el desarrollo de cáncer bacterial y *Phytophthora*. Por tal motivo, la ubicación de los goteros tiene que cuidar la saturación de agua en el cuello y tronco, ubicando dos laterales por hilera de planta con goteros de 4 l/h distanciados a 1 metro sobre la hilera, o en su efecto goteros de 2 l/h espaciados cada 0,5 m (Ferreyra y Sellés, 2013). En manzano, las distancias de plantación por lo general son de 3,8 x 1,2 m; 3,5 x 1,0 m y 3,3 x 0,8 m donde la distancia de los goteros en la sobre hilera, bajo estos marcos, debieran estar entre los 30 y 50 cm similares a los ya mencionados anteriormente. La doble línea y microaspersores pueden ser muy útiles si las plantaciones se encuentran en suelos con textura más arenosas para tener un buen mojamiento del área efectiva de raíces tanto horizontal como vertical. Las mismas consideraciones expuestas aquí habría que tener presente en los huertos de avellano europeo.

3.3.3.2. Microaspersión

Los RLAF de “alto caudal” suelen pulverizar el agua como una lluvia fina a nivel de superficie, principalmente entre 1 a 2 metros a través del aire con una presión de trabajo que casi no supera 1 bar (10 metros de columna de agua; m.c.a.). Se pueden clasificar en: *Microaspersión*, en donde estos emisores llevan un elemento que gira y distribuye el agua de riego en el suelo, accionado por la propia presión del agua (aspersores en miniatura) (Foto 20); y *Difusión*, la cual tiene un abertura no giratoria que pulveriza y distribuye el agua de riego en el suelo.



Foto 20. Sistema de riego por microaspersión en el cultivo de kiwi en un suelo franco arenoso con 30% de piedras (López-Olivari, 2014).

Este sistema también genera modificaciones en algunas características de la relación suelo, agua y planta:

a) Pérdidas de agua desde el suelo: las pérdidas de agua utilizando este sistema también son por evaporación del agua desde el suelo y por la transpiración desde las plantas (sembradas o plantadas en hilera). A diferencia del riego por goteo y cinta, el sistema por microaspersión presenta un diámetro de mojado más amplio que humedece casi toda la superficie del suelo en un cultivo o frutal. Aquí, las pérdidas de agua se producen principalmente por evaporación de las gotas en el aire (deriva), debido al viento y temperatura, y por evaporación del agua desde el suelo hacia la atmósfera.

b) Distribución del sistema radicular: el riego por microaspersión a diferencia del riego por goteo humedece una porción mayor de suelo (mayor diámetro de mojado), permitiendo que las raíces, con su plasticidad y rápida adaptación, puedan crecer y explorar vertical y horizontalmente una mayor superficie de suelo. Este comportamiento hace que las raíces, principalmente en frutales plantados en hilera, formen una red densa entre un árbol y otro (sobre hilera), debido al diámetro de mojado y traslape que se produce (Figura 21). La distribución y densidad radicular es mayor cerca del microaspersor y se va haciendo menos profundo a medida que se aleja del mismo (entre

hilera). Además, la distribución, densidad y profundidad radicular dependen también del tipo de textura del suelo (para el riego por goteo y microaspersión) y si existe cerca alguna napa freática.

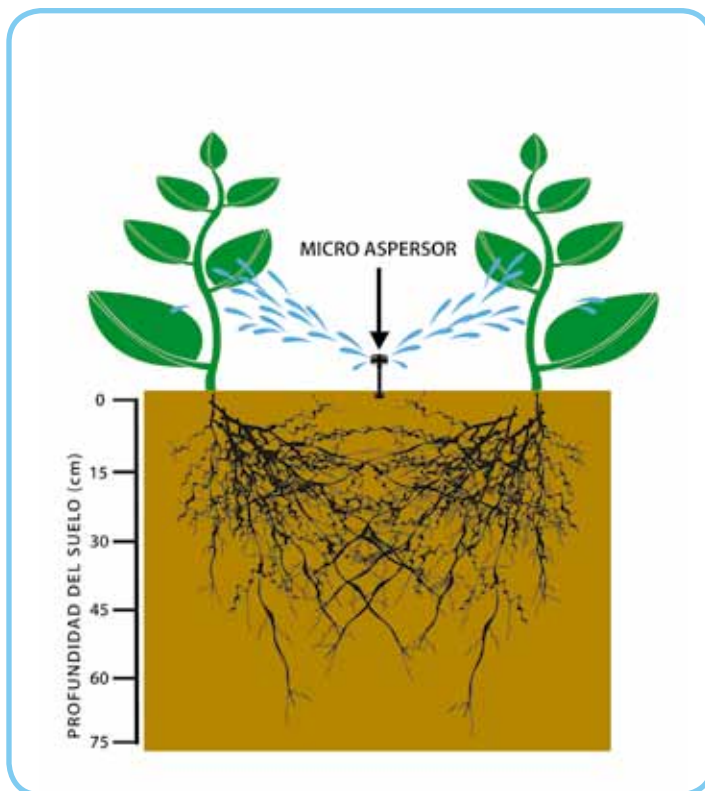


Figura 21. Distribución radicular entre un árbol frutal y otro (sobre hilera) utilizando un sistema de riego por microaspersión (López-Olivari, 2014).

c) Bulbo húmedo: igual que en el riego por goteo y cinta, el volumen de suelo humedecido por un microaspersor, donde el diámetro de mojado con el consecuente movimiento del agua determina la forma y tamaño del bulbo húmedo. Además, es el lugar en la cual se desarrolla, mayoritariamente, el sistema radicular de las plantas (Figura 22). El movimiento del agua en el suelo se produce en todas direcciones (vertical y horizontal), dependiendo de los poros que existen en éste. En los poros grandes el agua se mueve casi por gravedad, mientras que en poros pequeños el agua se mueve por capilaridad en todas las direcciones.

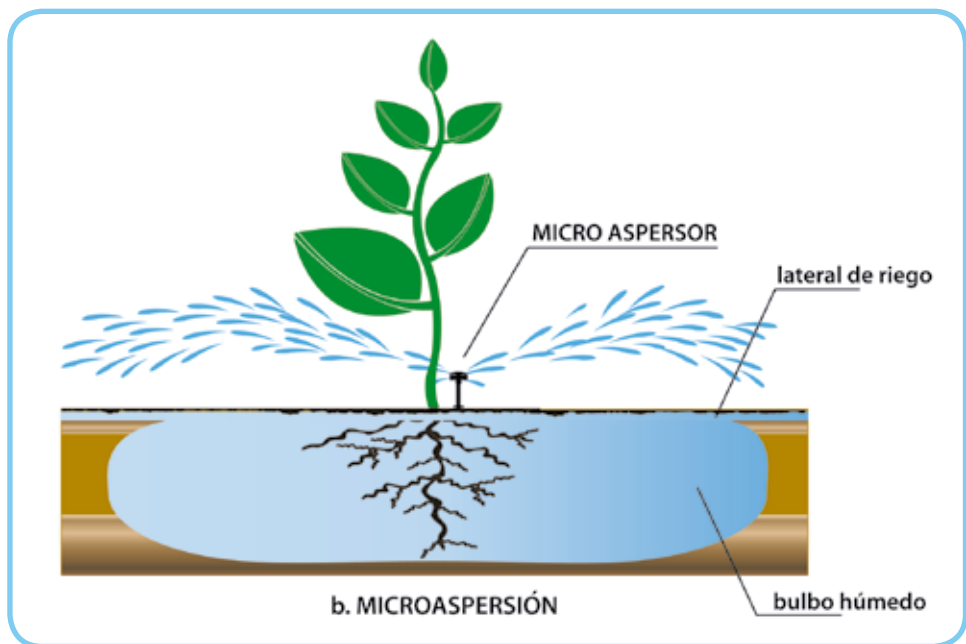


Figura 22. Esquema de la forma de un bulbo de mojado hecho por un aspersor en un suelo ligero (arenoso).

Así como en el riego por goteo y cinta, el tamaño y forma del bulbo húmedo de un microaspersor depende también de la textura del suelo, caudal del microaspersor, tiempo de riego y aireación del suelo. Dichos aspectos los analizaremos a continuación.

Textura del suelo: el tipo de suelo es muy importante para saber cuál será la forma y tamaño del bulbo de mojado que forma un microaspersor. En suelos arenosos las partículas son más gruesas por lo que, generalmente, el flujo del agua es tanto hacia los lados como hacia abajo, debido al diámetro de mojado del emisor. Lo anterior, genera un bulbo húmedo más amplio donde el tamaño de éste dependerá del tiempo que se tenga el microaspersor funcionando en ese suelo. Sin embargo, para un suelo arcilloso las partículas son más bien finas, el agua se mueve de manera lateral y vertical, lo que conlleva a que la forma del bulbo húmedo sea mayor cerca del microaspersor y menor a medida que se aleja del mismo. Lo anterior, se mejora debido al traslape generado con el microaspersor vecino. Esto ayuda a que las raíces puedan crecer y explorar con mayor facilidad el volumen de suelo mojado. Si combinamos estos dos tipos de suelo tendremos un suelo franco (mayoritariamente los del sur de Chile) de partículas mixtas entre gruesas, medias y pequeñas, por lo que el bulbo húmedo será más homogéneo y tendrá la forma y características de ambos.

Caudal del microaspersor: cuando el agua empieza a salir por el microaspersor se forma un diámetro de mojado mayor, comparado al diámetro de mojado hecho por un sistema de goteo o cinta. En un suelo arenoso con un microaspersor de bajo caudal la forma del bulbo húmedo tiende a ser de manera vertical, mientras que utilizando un microaspersor de alto caudal la forma del bulbo húmedo tiende a ser de manera horizontal y vertical. Por el contrario, si el suelo es arcilloso o franco la forma del bulbo húmedo para un microaspersor de bajo caudal tiende a ser horizontal y vertical, mientras que usando un microaspersor de alto caudal la forma que puede tener el bulbo definitivamente es más horizontal que vertical, ya que el suelo recibe más agua de la que éste puede infiltrar generándose un desplazamiento hacia los lados.

d) Aireación del suelo: los sistemas de riego gravitacionales y de baja frecuencia (aspersión) suelen usar cantidades muy altas de agua saturando de humedad, principalmente los suelos arcillosos, disminuyendo su aireación. Los riegos por microaspersión saturan un volumen de suelo del tamaño del diámetro de mojado, presentando también problemas de aireación cuando los riegos son efectuados de manera diaria y/o excesiva en suelos con una alta capacidad de retención de agua, como fue abordado en el ítem de riego por goteo. Esta condición reduce fuertemente la capacidad de absorción de agua por las raíces. Para mejorar tal condición se recomienda distanciar la aplicación del agua de riego (día por medio o cada dos días) dependiendo de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica existente en ese suelo.

Respecto a las ventajas del sistema de riego presurizado de alta frecuencia se pueden considerar las siguientes:

- 1.- Ahorro de agua: en este sentido se eliminan las pérdidas por conducción, ya que el agua es transportada por tuberías hasta la planta, reduciendo las pérdidas por infiltración y escurrimiento.
- 2.- Uniformidad de aplicación: al tener emisores de igual caudal y ubicados a distancia regulares, inclusive con topografía irregular, mejora la uniformidad de agua aplicada.
- 3.- Aumento de la superficie bajo riego: con el sistema presurizado se aumenta en un 35% el área de riego teniendo la misma disponibilidad de agua, dado que incrementa la eficiencia del riego.
- 4.- Menor presencia de malezas: esto se produce, ya que el humedecimiento del suelo es localizado y el agua es aplicada casi filtrada, sin presencia de semillas.
- 5.- Compatible con labores culturales: este sistema de riego se puede compatibilizar con otras labores de manejo agronómico mientras se riega (poda, raleo, cosecha, entre otras).

6.- Ahorro en labores culturales: dado el menor control de malezas, se puede reducir las labores de mejoras en la infiltración del suelo, preparación de suelo, otros.

7.- Ahorro en mano de obra: debido a que el sistema es automatizado un operador de riego puede manejar cerca de 70 a 100 hectáreas (ha).

8.- Aprovechamiento de terrenos marginales o no agrícolas: se puede usar en terrenos en donde no es factible utilizar riego de superficie tradicional (Mangas, surcos, otros). Además, se puede aumentar la recuperación de suelos que inicialmente no son aptos para la agricultura.

9.- Mejoras en la producción y calidad de frutos: se alcanza al mejorar la entrega eficiente y oportuna de las necesidades hídricas y nutritivas a lo largo del desarrollo del cultivo durante la temporada.

10.- Fertirriego: se puede fertilizar en el mismo momento en que se riega y de manera continua cuando lo requiera el cultivo.

11.- Empleo de aguas salinas: aguas con alta cantidad de sal pueden utilizarse en el riego de alta frecuencia, pero el manejo bajo estas situaciones es complicado.

12.- Automatización: estos sistemas de riego son posibles automatizarlos de manera parcial o total, facilitando la operación y permitiendo la aplicación de programas de fertirrigación.

Si bien este sistema tiene ventajas, también presenta desventajas como las siguientes:

- 1.- Costo elevado de adquisición e instalación: antes de realizar una inversión de un sistema presurizado considerar la relación que existe entre costo y beneficio. Tener presente si el cultivo es suficientemente rentable para justificar el uso del sistema.
- 2.- Consumo de energía: el costo de electricidad es un factor a tener en cuenta al momento de realizar una inversión de un sistema presurizado.
- 3.- Necesidad de bomba de repuesto: para evitar un déficit hídrico prolongado, es necesario tener una bomba de repuesto.
- 4.- Necesidad de un sistema de filtrado: para un adecuado humedecimiento localizado en el suelo y sin semillas, es necesario que el sistema presente filtros.
- 5.- Necesidad de mantenimiento y limpieza del sistema: se hace necesario la limpieza del cabezal, tuberías y laterales. Dependiendo de la calidad del agua, esto se realiza entre 1 a 3 veces por temporada agrícola.
- 6.- Mano de obra especializada: contar con personal calificado para solucionar los problemas relacionados al sistema de riego. Es necesario verificar de forma

permanente el funcionamiento de los emisores, de obstrucciones de las líneas de riego, rotura de tuberías, válvulas y equipo en general.

- 7.- Realizar un buen diseño del sistema: es fundamental que el diseño del sistema se haga de manera correcta, desde un punto de vista agronómico e hidráulico. Un diseño no apropiado puede producir disminuciones en el rendimiento y calidad del cultivo, gastos de energía innecesarios y problemas de manejo.
- 8.- Compactación: el continuo paso de maquinaria al lado de los laterales de riego puede producir un inadecuado humedecimiento y compactación del suelo (encharcamiento y deriva).

Como referencia, las ventajas de un sistema de riego por microaspersión, comparado a un sistema de riego por goteo o cinta se presentan a continuación:

- 1.- Mayor superficie de mojado: el sistema de riego por microaspersión permite una mayor exploración de las raíces y aprovechamiento de los nutrientes del suelo. Esto es especial para suelos pobres y de baja retención de humedad (suelo arenoso y pedregoso).
- 2.- Menor riesgo de obturaciones: el microaspersor presenta un mayor diámetro de orificio y la salida del agua se realiza con mayor velocidad.
- 3.- Mejor inspección del funcionamiento del sistema: la inspección visual de un adecuado funcionamiento del sistema es más rápido y efectivo que en un sistema de riego por goteo.

Así, las desventajas que se pueden encontrar al comparar un sistema de riego por microaspersión y por goteo son las siguientes:

- 1.- Menor eficiencia de aplicación: debido a la mayor evaporación del agua por efecto del viento, las pérdidas pueden ser hasta de un 15% en zonas áridas y ventosas. En este tipo de zonas se recomiendan riegos nocturnos o disminuir el ángulo del aspersor.
- 2.- Mayor control de malezas: en el sistema de riego por microaspersión hay que mantener limpio y libre de malezas para evitar que intercepten al agua proyectada por el aspersor.
- 3.- Dificultades en mantener la posición vertical de emisores: como en los predios se deben realizar trabajos de poda, raleo y cosecha, por lo general las personas suelen mover o romper las líneas de riego y microaspersores, pudiendo provocar efectos negativos en la uniformidad del diámetro de mojado.

- 4.- Problemas fitosanitarios: el sistema de riego por microaspersión provoca el humedecimiento de los troncos de los árboles, favoreciendo la posible entrada de agentes patógenos y enfermando las plantas.
- 5.- Problemas de substracción: los microaspersores son más vistosos en el campo y llaman la atención, lo que puede provocar el robo o hurto de ellos.
- 6.- Limitación del ingreso al cultivo: en este sentido limita o dificulta la entrada de maquinaria y efectuar labores manuales.
- 7.- Daños mecánicos y ambientales: dado que el emisor está al descubierto existe un mayor desgaste natural de las partes móviles del sistema por radiación solar, temperatura, humedad y daño mecánico por maquinaria, debiendo reemplazar esas partes para su correcto funcionamiento.

3.3.3.3. Componentes del riego de alta frecuencia

Las partes fundamentales de una instalación de riego presurizado y localizado de alta frecuencia son los siguientes: Unidad de bombeo, cabezal de control de riego, dispositivos de control, red de distribución y emisores (goteo y microaspersión).

Por otro lado, los pequeños agricultores han empezado lentamente a implementar tecnologías limpias en sus sistemas productivos. Un ejemplo de ello está cerca de la localidad de Máfil donde un agricultor instaló paneles solares en su predio. Lo anterior, con el fin de alimentar con energía eléctrica una bomba sumergible, la cual extrae el agua desde un tranque acumulador para depositarla en un estanque de 5 mil litros, ubicado sobre una plataforma de 3 a 4 metros de altura. Esto le permite regar sus hortalizas de invernadero y frutillas con un sistema de riego por cinta (Foto 21).

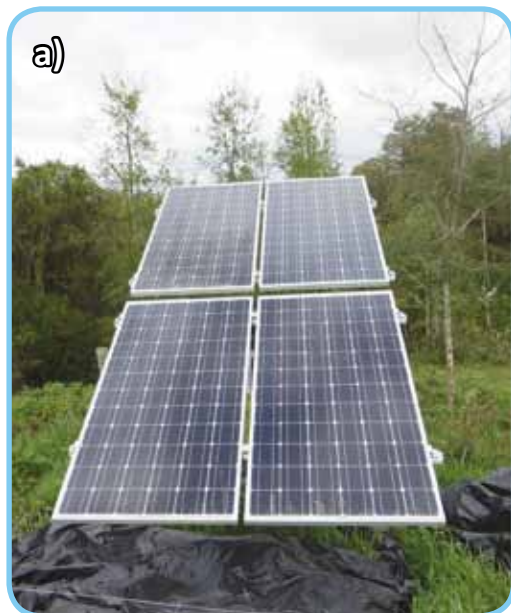


Foto 21. Paneles solares (a) para la alimentación de energía eléctrica de una bomba sumergible (b) cerca de la localidad de Máfil (Región de Los Ríos) (López-Olivari, 2014).

3.3.3.4. Consideraciones prácticas del riego presurizado

Como primer acercamiento, antes de escoger un sistema RLAF se deben considerar algunos factores que determinarán la elección del sistema de riego. Hablamos de rentabilidad del cultivo, praderas, hortalizas o frutales, características físicas del suelo (suelo arenoso, arcilloso o franco), clima de la localidad, características del agua, topografía del terreno y factores de manejo agronómico.

Por otro lado, la disposición de los emisores tiene que ser de tal manera que los bulbos se traslapen, de lo contrario las raíces tendrán dificultades en atravesar la zona seca, situada entre bulbos de mojado. Así, para el caso de microaspersores, basta con medir el área que efectivamente se moja o calcularla a partir de la información que entregan los catálogos. Sin embargo, para el caso de goteo o cinta es más complicado, debido a que es localizado y el bulbo húmedo, como se mencionó en párrafos anteriores, depende de factores como textura, estratificación del suelo, caudal del emisor, tiempo y volumen de riego. Si bien cada caso es particular, en el Cuadro 14 se muestra algunos diámetros de mojado referenciales para distintos tipos de suelo y profundidad de raíces. Además, el porcentaje de traslape óptimo está entre 15 y 30%. Por su parte, en árboles o cultivos u hortalizas jóvenes, bajo un riego por goteo o cinta, es aconsejable situar éstos muy cerca de la planta y cuando crezcan y se desarrollen reubicarlos a la posición original.

Cuadro 14. Diámetro de mojado referencial de un emisor (goteo) de 4 L/h para dos profundidades y tres tipos de suelo.

Profundidad de raíces y textura de suelo	Grados de estratificación del suelo		
	Homogéneo	Estratificado	En capas
	Diámetro de mojado (m)		
Profundidad = 0,8 m			
Ligera (Arenoso)	0,50	0,80	1,10
Medio (Franco)	1,00	1,25	1,70
Pesada (Arcilloso)	1,10	1,70	2,00
Profundidad = 1,7 m			
Ligera (Arenoso)	0,80	1,50	2,00
Medio (Franco)	1,25	2,25	3,00
Pesada (Arcilloso)	1,70	2,00	2,50

Fuente: (Pizarro, 1996)

Ejemplo: Si el radio del bulbo húmedo (r) de un gotero es de 40 cm y se desea que haya un traslape o solape (s) de un 20%. ¿A qué distancia debe colocarse un gotero de otro?.

$r = 40\text{ cm}$
 $s = 20\%$

Con estos antecedentes puedo calcular la separación de dos goteros utilizando la siguiente expresión:

$$Se = r \left(2 - \frac{s}{100} \right) = 40 \left(2 - \frac{20}{100} \right) = 72\text{ cm}$$

Es decir, se necesita una distancia de 72 cm entre goteros para obtener un traslape de 20% de los bulbos húmedos, cuyo radio es de 40 cm.

3.3.3.5. Evaluación de la uniformidad

Con la información anterior podemos saber si el sistema RLAF permite aplicar el agua de riego con caudales similares en toda la sub-unidad de riego, sector de riego o de todo el predio. Para ello, existe el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU) que sirve para evaluar la uniformidad del sistema de riego que se está utilizando, según la siguiente expresión:

$$CU = \frac{\text{(Caudal promedio del 25\% de emisores de menor caudal)}}{\text{(Caudal promedio del total de las evaluaciones)}}$$

Para evaluar si el sistema RLAF presenta uniformidad de riego buena o mala se muestran algunos criterios:

CU excelente entre 90 y 100%

CU bueno entre 80 y 90%

CU aceptable entre 70 y 80%

CU inaceptable menor a 70%

Para evaluar y determinar el CU de sistemas RLAF en el predio se aconseja realizarlo en instalaciones nuevas y después una vez al año. En la Figura 23 se muestra un esquema de los puntos de muestreo que debieran realizarse en una sub-unidad de riego, donde se eligen la primera línea, el tercio, dos tercios y la última línea de riego. En cada una de ellas se consideran cuatro plantas usando el mismo criterio anterior (primera, 1/3, 2/3 y última) y se evalúa la descarga o caudal total (uno o más emisores) que recibe cada planta (Foto 22). En el caso de los microaspersores, es más recomendable utilizar una botella plástica para evitar salpicaduras y luego medir su caudal en un recipiente graduado.

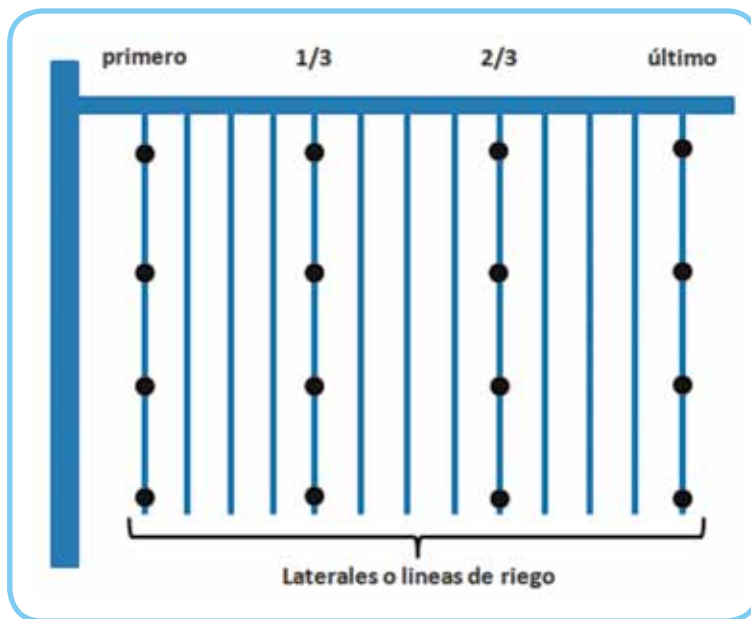


Figura 23. Diagrama referencial de una sub-unidad de riego con la ubicación de los puntos de muestreo del gasto o caudal de los emisores en cada planta.

Una baja uniformidad del riego puede darse por *causas hidráulicas* (diseño inadecuado, falta de reguladores de presión, otros) o simplemente una *baja uniformidad de los emisores* (obturaciones del emisor o un inadecuado coeficiente de variación de fábrica). Pero, en la mayoría de los casos, la baja uniformidad del riego se produce por baja uniformidad de los emisores, por lo que debe comprobarse si están parcial o totalmente obturados por suciedad u otro elemento, o si su coeficiente de variación de fábrica es bajo.



Foto 22. Mediciones en campo de la descarga o caudal de emisores. a) para riego por goteo (igual para cinta) en murtilla, y b) para riego por microaspersión en un cuartel de riego en kiwi (López-Olivari, 2014).

Otro elemento práctico a considerar es la realización de ciertas labores antes y después que empiece una temporada de riego, pudiendo potenciar de manera positiva la uniformidad del riego:

- 1.- Realizar una revisión exhaustiva a la red de tuberías entre 1 a 2 semanas antes y después de cada temporada de riego.
- 2.- Revisar la o las bombas existentes, colocándolas en funcionamiento el tiempo que se estime conveniente.
- 3.- Revisar la instalación eléctrica del sistema de riego, sobre todo el cabezal de riego.
- 4.- Revisar las válvulas (automáticas o manuales) que regulan el riego de todo el sistema.
- 5.- Los filtros se deben lavar y en caso de algún daño, repararse o cambiar.
- 6.- Revisar que los reguladores de presión del sistema funcionen correctamente.
- 7.- Deben lavarse las tuberías empezando de mayor a menor diámetro. Este lavado se realiza a máxima presión, con el fin de eliminar las impurezas o barro adherido a los tubos.
- 8.- Realizar un lavado de todos los laterales del sistema abriendo al final o extremo de la línea de riego (llamado descole).
- 9.- Revisar con detalle los emisores a lo largo de las líneas de riego, verificando si existen obturaciones o caídas (microaspersores). En caso de existir emisores tapados deben destaparse o bien reemplazar. Al no utilizar agua de buena calidad, se pueden colocar filtros de malla o, si se puede, realizar acumuladores de agua para que las partículas que trae el agua decanten, minimizando el ingreso de ellas al sistema completo.

CAPÍTULO 4

MANEJO Y PROGRAMACIÓN DE RIEGO

El manejo del agua de riego no sólo considera conocer las diferentes características de los sistemas de riego y aplicarlos, sino también entender cómo el agua (entregada por los métodos de riego o lluvia efectiva) se mueve desde el suelo a la atmósfera. Este desplazamiento va desde la absorción de las raíces, pasando por el xilema de la planta, para luego salir como vapor de agua a través de los estomas de las hojas hacia la atmósfera, en un proceso conocido como transpiración (T).

La cuantificación y monitoreo de este movimiento de agua es fundamental para determinar las necesidades hídricas de las plantas y aplicar una óptima programación del riego. Los procesos descritos anteriormente se explican de manera dinámica y amigable en este capítulo.

4.1. Problemas asociados a un mal manejo del agua de riego

En la mayoría de los casos, por falta de información o asesoría directa, los agricultores aplican cantidades inadecuadas de agua, ya sea más de la que realmente necesitan los cultivos o bien cantidades inferiores. Así, una mala práctica puede ocasionar problemas serios a los cultivos, perdiendo cosechas completas y por ende, los retornos de dinero. Por tal razón, es necesario que el riego se aplique en la cantidad adecuada y de manera eficaz para cubrir el consumo de agua de los diferentes cultivos.

- a) **Pérdida de agua:** es la principal causa de una baja eficiencia en el uso del recurso hídrico, provocado escurrimiento de agua en la superficie al usar grandes caudales o aplicar riegos excesivos. Además, se produce una infiltración del agua en profundidad, mojando por debajo de la zona de raíces de las plantas. Lo anterior, debido al uso de grandes superficies de terreno asociado a tiempos de riego excesivos.
- b) **Lavado de fertilizantes:** el exceso de flujo del agua de riego, fuera del área aprovechable por las raíces, hacen que los elementos minerales móviles (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, otros) se lixivien generando una contaminación de las aguas subterráneas. La idea es que los fertilizantes aplicados vía sistema presurizado de alta frecuencia (goteo, cinta y microaspersión) se apliquen en los mismos tiempos de riego calculados desde una programación de riego óptima, pudiendo minimizar el efecto del lavado de nutrientes.

- c) **Suelos pesados:** los suelos arcillosos presentan la dificultad de tener poca velocidad de infiltración, siendo muy frecuente la aparición de anegamientos que provocan poca aireación y finalmente una asfixia radicular de las plantas. Existen cultivos muy sensibles al exceso de agua, como por ejemplo el pimentón y la papa, mientras que en frutales el frambueso, avellano y castaño europeo presentan problemas en el cuello de las plantas por exceso de agua. En algunos casos, dichos excesos pueden provocar la muerte de las plantas.
- d) **Disminución del rendimiento y calidad:** el mal manejo del agua de riego, ya sea por falta o exceso de agua, merma en gran medida el rendimiento y calidad de los productos agrícolas. Un exceso de agua puede retardar la senescencia, aumentar el crecimiento (menor rendimiento), e incrementar la susceptibilidad de los cultivos al ataque de plagas y enfermedades. Una falta de agua puede provocar una disminución del crecimiento, incremento del aborto floral, disminución del tamaño de frutos y hojas, y una disminución del rendimiento y calidad.

4.2. Información básica para programar el riego

Esta sección contiene información necesaria de tener en cuenta para aplicar el agua cuando se requiera (frecuencia de riego) y las cantidades de agua en el momento oportuno (tiempo de riego). Esto permitirá evitar que las plantas presenten síntomas de estrés (por mucha o poca agua), sin alterar mayormente el rendimiento y calidad de la producción. En tal sentido, se dan conocer conceptos de la interacción suelo, agua, planta y clima, orientados solo para realizar una adecuada programación de riego.

4.2.1. Información de suelo

Las características físicas de un suelo (textura, estructura, materia orgánica, profundidad, entre otras) es la información necesaria para entender el movimiento del agua en el suelo (infiltración acumulada de agua en el suelo). Además, para cuantificar la humedad disponible total y fácilmente aprovechable (AFA) de un suelo a una profundidad de raíces dada.

4.2.1.1. Propiedades físicas de suelo

Textura del suelo: se refiere al tamaño de las partículas que lo forman. Existen tres fracciones mayoritarias que son: arena, limo y arcilla, que combinadas en diferentes porcentajes definen las variadas texturas que pueden ser: suelos arenosos, suelos francos, suelos arcillosos y las posibles combinaciones intermedias. Además, algunos suelos pueden contener uno o más horizontes en el perfil y más de una estrata, dependiendo de ciertas características descriptivas arbitrarias que indiquen diferencias en el perfil (textura, color, presencia de piedras, cantidad de raíces, porosidad, otros). Esto hace que el agua se mueva o infiltre a diferentes velocidades. Lo anterior va a incidir directamente en la retención de agua de un suelo y por ende, en la programación del riego.

Así, para un mismo peso de suelo, la textura arcillosa presenta una mayor capacidad para retener agua que las texturas de suelo arenosa y limosa, porque la primera tiene una mayor superficie expuesta (Figura 24). Otra causa, es que la arcilla (micelas de arcilla) posee carga negativa y el agua carga positiva, por lo cual se mantienen más tiempo unidas entre ellas por los enlaces de hidrógeno. Por otro lado, un suelo con mucha arcilla puede producir un exceso de retención de humedad, no siendo muy favorable para la aireación del suelo. Por esta razón, generalmente, los suelos de textura franca (que contengan entre 8 y 25% de arcilla, y no más de 50% de arena y 50% de limo), son los más productivos, como es el caso de los suelos del sur de Chile.

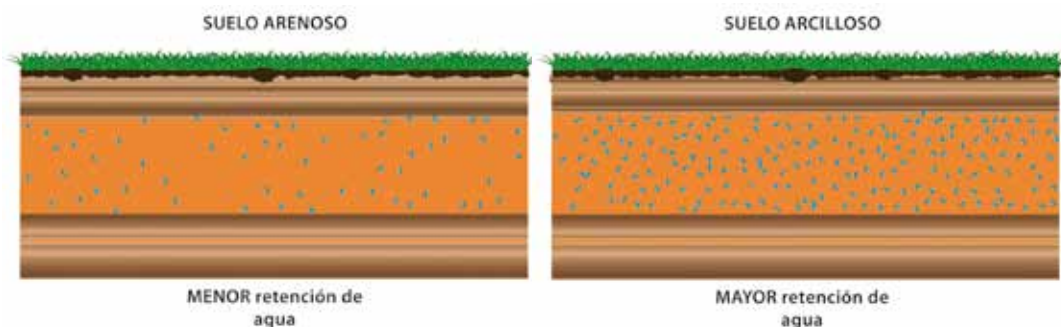


Figura 24. Capacidad de retención de agua en un suelo con textura arenosa y arcillosa (López-Olivari, 2014).

La textura de un suelo puede determinarse de dos maneras:

- a) **Sensorial (tacto):** la determinación de la textura de un suelo por medio del “tacto” es una metodología realizada en el mismo terreno o predio (*in situ*). Esto permite distinguir las distintas partículas del suelo, siendo una técnica de fácil aplicación una vez que se adquiere la experiencia.
- b) **Laboratorio física de suelos:** en este caso, una o varias muestras de suelo de un predio son enviadas al laboratorio para que su textura sea analizada cuantitativamente. Esto determinará la proporción real de arena, limo y arcilla que presenta una o varias muestras de suelo expresadas en porcentaje (%). Una vez obtenida dicha información es posible establecer la clase textural de un suelo, mediante el uso de un “Triángulo Textural”.

Por ejemplo, si el resultado de la textura sacado del análisis de laboratorio de suelos contiene 33% de arcilla, 25% de arena y 45% de limo, la clase textural que corresponde a esa proporción de tamaño de partículas de la muestra de suelo es franco arcilloso (Figura 25).

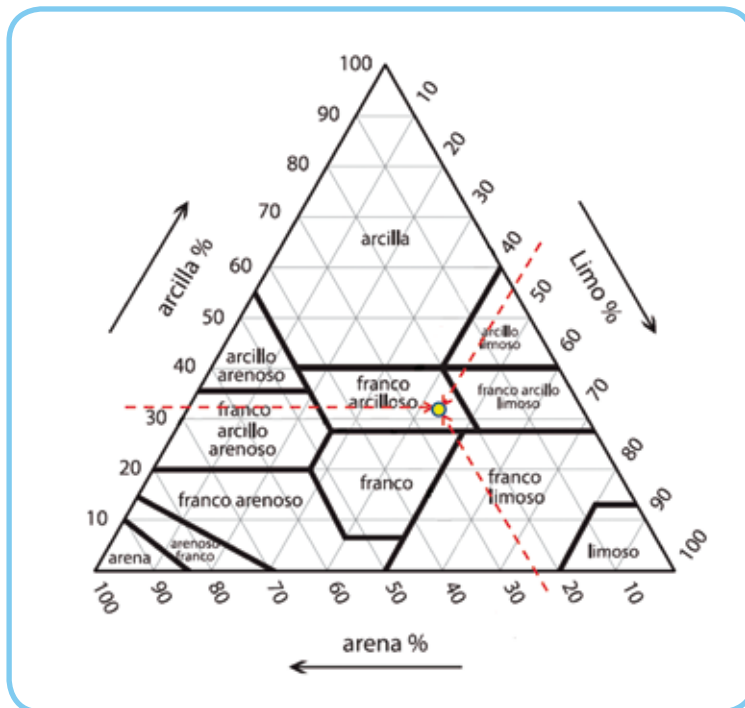


Figura 25. Triángulo de texturas para determinar las clases texturales de un suelo.

- **Estructura del suelo:** se refiere al orden en que se encuentran las partículas en el suelo. Tiene relación con la preparación de los mismos, erosión, aireación y absorción del agua. Las partículas de arena, limo y arcilla más las partículas orgánicas pueden unirse entre sí formando *agregados* y creando una estructura en el suelo. En un suelo compactado hace disminuir el número de poros, afectando la aireación y el contenido de oxígeno del suelo, la absorción de agua por parte del sistema radicular y el drenaje del agua en el suelo se hace lento. Bajo estas condiciones, se afecta el normal crecimiento y desarrollo del sistema radicular. Mayoritariamente, se pueden distinguir seis tipos de estructuras de suelo: granular, prismática, masiva, grano suelto, blocosa (en bloques) y laminar.
- **Materia orgánica (MO):** la MO promueve la ordenación estructural y la estabilidad de los agregados de un suelo. La MO es de color oscuro y muy abundante en la mayoría de los suelos del sur de Chile (entre 8 y 28% aproximadamente), y por ende, la cantidad de humedad que pueden contener y retener estos suelos es mucho mayor, si lo comparamos a un suelo de la zona central o norte de Chile. Los principales efectos de la MO sobre el suelo radican en mejorar su estructura, sobre todo los de textura arcillosa por aumentar su porosidad, y con ello, estimular y mejorar la exploración del sistema radicular. Sin embargo, para efectos de aplicar

mayor o menor agua de riego y con qué frecuencia, la MO juega un rol importante en la capacidad que tiene un suelo en retener esta agua. Así, para efectos de cálculo de la humedad aprovechable de un suelo, MO va incorporada en el concepto y valor numérico de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

- **Relación entre masa y volumen del suelo:** las relaciones existentes entre masa y volumen de un suelo es otro factor a considerar al momento de programar los riegos, tanto a nivel conceptual como las relaciones generadas entre estos dos componentes. El suelo está compuesto de tres fases que son: sólida, líquida y gaseosa. La parte sólida contiene partículas minerales y materia orgánica (en un pequeño porcentaje), excepto en el caso de suelos orgánicos o de origen volcánico (zona sur de Chile). El espacio restante que no es ocupado por la fase sólida, lo conforman los poros del suelo que a su vez están ocupados por las fases líquida y gaseosa.

Las relaciones de masa y volumen entre sus tres fases se muestran esquemáticamente en la Figura 26. La totalidad de la figura representa la masa y el volumen totales del suelo y se divide en tres partes: la sección más baja muestra la fase sólida, la del medio la fase líquida y la parte superior la fase gaseosa. Al lado derecho de la figura se muestran las relaciones de volumen del suelo, mientras que al lado izquierdo se presentan las relaciones de masa.

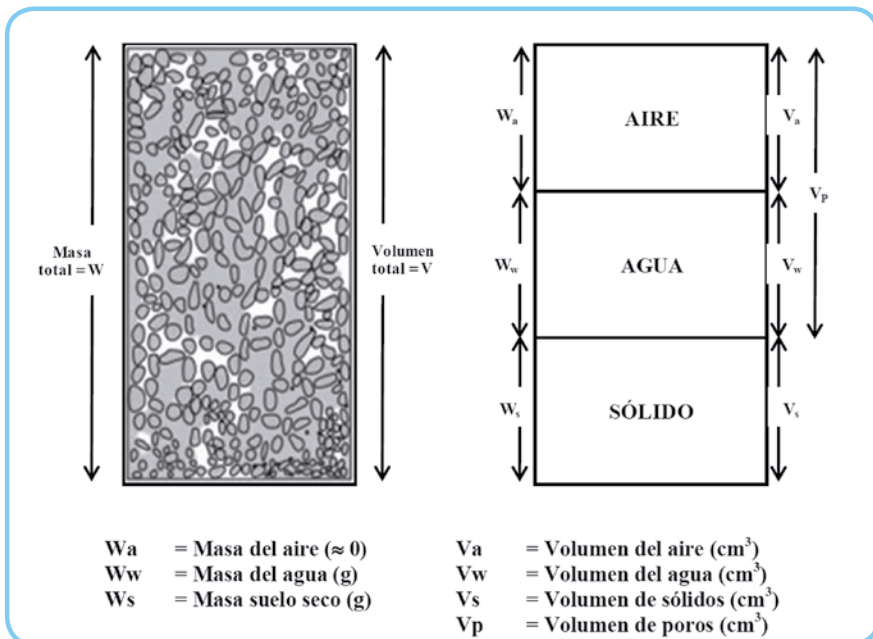


Figura 26. Representación esquemática del suelo como un sistema de tres fases (López-Olivari, 2014).

A partir de la Figura 26 se pueden definir los términos que normalmente se usan para expresar las diferentes relaciones existente entre la masa y el volumen de un suelo, estos son: a) densidad real; b) densidad aparente; c) porosidad del suelo; d) espacio vacío que ocupa un suelo; e) humedad gravimétrica; f) humedad volumétrica; g) lámina de agua; h) grado de saturación con agua de los poros en un suelo; e i) el contenido de aire como una fracción entre el volumen del aire y el volumen total de un suelo. Pero, para propósitos de concepto y cálculo de la programación del riego se enfocará en solo cinco de las nueve relaciones existentes, detalladas a continuación:

a) Densidad real o de sólidos (ρ_s): el término densidad se refiere a la cantidad de masa que ocupa un volumen determinado. Así, la densidad real corresponde a la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen que éstas ocupan en un suelo, sin considerar el espacio poroso. La densidad real prácticamente se asume constante a lo largo del tiempo, ya que casi no se afecta por la estructura y naturaleza de las partículas del suelo (suelo mineral, 2,65 g/cm³), el cual se puede usar en gran parte de los suelos. Sin embargo, en suelos que contienen una gran cantidad de materia orgánica (MO), como son los suelos volcánicos o Andisoles, reducen fuertemente el valor de la densidad real (Cuadro 15).

Cuadro 15. Densidad real para diferentes constituyentes minerales de un suelo.

Constituyente Mineral	Densidad real (g/cm³)
Ortoclasa	2,50 - 2,60
Mica	2,80 - 3,20
Cuarzo	2,50 - 2,80
Humus (la base de la MO)	1,37

MO: Materia orgánica. (Adaptado de Ferreyra y Selles, 2013).

La densidad real puede ser determinada a través de la siguiente relación:

$$\rho_s = \frac{M_{ss}}{V_s}$$

Donde:

- ρ_s = Densidad de sólidos (g/cm³)
- M_{ss} = Masa de sólidos o suelo seco después de 24 a 48 hrs a 105°C (g)
- V_s = Volumen ocupado por el material sólido (cm³)

b) Densidad aparente (ρ_a): se refiere a la relación que existe entre la masa seca de una muestra de suelo y el volumen total ocupado por dicha muestra de suelo en el campo. El volumen total de un suelo corresponde al que ocupan las partículas sólidas, incluyendo los poros. Así, ρ_a puede ser calculado utilizando la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{M_{ss}}{V_t}$$

Donde:

ρ_a = Densidad aparente (g/cm³)

M_{ss} = Masa de sólidos o suelo seco después de 24 a 48 hrs a 105°C (g)

V_t = Volumen total del suelo (cm³)

La ρ_a como está en función del volumen total variará con la textura de un suelo, contenido de materia orgánica, labores de suelo, etc. Así, ρ_a y la textura de un suelo pueden influir enormemente en el contenido de humedad que retenga un tipo de suelo, en la profundidad de exploración de las raíces, y además, en su crecimiento y desarrollo del sistema radicular completo. En los Cuadros 16, 17 y 18 se muestran algunos valores referenciales de densidad aparente para suelos de origen mineral y de origen volcánico.

Cuadro 16. Variación de la densidad aparente (ρ_a) para diferentes clases texturales de suelo de origen mineral.

Textura	ρ_a (g/cm ³)
Arenoso	1,55 - 1,80 (1,65)
Franco-arenoso	1,40 - 1,60 (1,50)
Franco	1,35 - 1,50 (1,40)
Franco-arcilloso	1,30 - 1,40 (1,35)
Arcillo-arenoso	1,25 - 1,35 (1,30)
Arcilloso	1,20 - 1,30 (1,25)

Fuente: Elaboración propia y adaptado de Ferreyra y Sellés, 2013.

Como se observa, los valores de densidad aparente en suelos de origen mineral son mucho mayores si lo comparamos a los valores para suelos de origen volcánico o similar. Este efecto en los valores de ρ_a se debe al contenido de materia orgánica presente en el suelo, incrementando la porosidad del mismo y por ende, el volumen total. Asimismo, para un suelo arenoso la densidad aparente es más alta si lo comparamos con un suelo de textura arcillosa, siempre que éste no se encuentre compactado.

Cuadro 17. Valores “referenciales” de densidad aparente (ρ_a), humedad gravimétrica a capacidad de campo (W_{cc}) y punto de marchitez permanente (W_{PMP}) de la Región de La Araucanía para diferentes clases texturales de suelo de origen volcánico (Orden Andisol). También, se agregan suelos del orden Inceptisol y Mollisol.

Orden Andisol (trumao y ñadis)					
Textura	ρ_a (g/cm ³)	W_{cc} (%p/p)	W_{PMP} (%p/p)	HA (%)	Altura de agua promedio (mm/m)
Franco-arenoso	0,81-1,06 (0,93)	37,8-24,0 (30,9)	29,1-12,4 (20,8)	10,1	93,9
Franco	0,67-0,88 (0,77)	67,7-37,3 (52,5)	44,6-20,9 (32,7)	19,7	151,6
Franco-limoso	0,59-0,98 (0,78)	78,6-41,9 (60,2)	67,6-26,4 (47,0)	13,2	102,9
Franco-arcillo-limoso	0,57-0,98 (0,77)	73,6-48,1 (60,8)	58,2-27,8 (43,0)	17,8	137,0
Franco-arcilloso	0,60-0,98 (0,79)	80,3-36,1 (58,2)	50,3-28,6 (39,4)	18,7	147,7
Arcillo-limoso	0,62-0,94 (0,78)	78,4-42,0 (60,2)	61,0-30,0 (45,5)	14,7	114,6
Arcilloso	0,60-0,93 (0,76)	69,0-54,4 (61,7)	59,4-30,6 (45,0)	16,7	126,9
Orden Inceptisol (suelos de Tundra)					
Arenoso	1,25-1,47 (1,36)	10,0-5,0 (7,5)	5,0-3,0 (4,0)	3,5	47,6
Areno-franco	1,16-1,21 (1,18)	18,7	11,1	7,7	90,8
Franco-arenoso	0,78-1,60 (1,19)	37,6-13,0 (25,3)	23,2-8,0 (15,6)	9,7	115,4
Franco	0,83-1,27 (1,05)	39,1-14,8 (26,9)	19,9-10,3 (15,1)	11,8	123,9
Franco-limoso	1,00-1,21 (1,10)	43,1-35,3 (39,2)	22,5-20,2 (21,3)	17,8	195,8
Franco-arcilloso	1,00-1,44 (1,22)	38,6-17,1 (27,8)	18,2-11,7 (14,9)	12,9	157,3
Franco-arcillo-arenoso	1,11-1,66 (1,38)	23,3-18,6 (20,9)	16,0-10,5 (13,2)	7,7	106,2
Arcillo-limoso	1,01-1,20 (1,10)	38,0-24,9 (31,4)	29,4-17,8 (23,6)	7,8	85,8
Arcilloso	0,91-1,41 (1,16)	43,1-17,4 (30,2)	29,9-13,3 (21,6)	8,6	99,7
Orden Mollisol (suelos con un horizonte superficial negro; materia orgánica)					
Franco-arenoso	1,03-1,47 (1,25)	35,0-7,0 (21,0)	19,0-4,0 (11,5)	9,5	118,7
Franco	0,79-1,28 (1,03)	42,0-29,0 (35,5)	18,0-13,0 (15,5)	20,0	206,0
Franco-limoso	1,01-1,17 (1,09)	37,0-29,0 (33,0)	27,0-7,0 (17,0)	16,0	174,4
Franco-arcilloso-limoso	0,94-1,11 (1,02)	40,0-34,0 (37,0)	27,0-24,0 (25,5)	11,5	117,3
Franco-arcilloso	1,03-1,13 (1,08)	31,5	21,5	10,0	108
Arcillo-limoso	0,96-1,13 (1,04)	43,0-36,0 (39,5)	30,0-23,0 (26,5)	13,0	135,2
Arcilloso	1,29-1,39 (1,34)	42,0-34,4 (38,2)	26,0-22,0 (24,0)	14,2	190,2

Rangos de valores promedios para suelos con profundidad entre 0 y 100 cm. (); valores promedios. HA; humedad aprovechable. Fuente: Elaboración propia con datos de CIREN, 2002.

Cuadro 18. Valores “referenciales” de densidad aparente (ρ_a), humedad gravimétrica a capacidad de campo (W_{cc}) y punto de marchitez permanente (W_{PMP}) de la Región de Los Ríos y Los Lagos para diferentes clases texturales de suelo de origen volcánico (Orden Andisol). También, se agregan suelos del orden Inceptisol y Mollisol.

Orden Andisol (trumao y ñadis)					
Textura	ρ_a (g/cm ³)	W_{cc} (%p/p)	W_{PMP} (%p/p)	HA (%)	Altura de agua promedio (mm/m)
Arenoso	0,39-0,85 (0,62)	22,4-66,0 (44,2)	4,8-48,3 (26,5)	17,7	109,7
Areno-franco	0,26-1,14 (0,70)	18,2-163,9 (91,0)	13,3-69,0 (41,1)	49,8	348,6
Franco-arenoso	0,33-1,24 (0,78)	15,8-135,2 (75,5)	13,4-57,9 (35,6)	39,8	310,4
Franco	0,53-0,93 (0,73)	35,8-143,8 (89,8)	17,3-40,8 (29,0)	60,8	443,8
Franco-limoso	0,55-0,88 (0,71)	55,5-76,3 (65,9)	27,9-47,6 (37,7)	28,2	200,2
Franco-arcillo-limoso	0,50-0,86 (0,68)	48,1-73,6 (60,8)	32,3-58,2 (45,2)	15,6	106,0
Franco-arcilloso	0,51-0,98 (0,74)	31,3-77,4 (54,3)	24,4-52,2 (38,3)	16,0	118,4
Franco-arcillo-arenoso	0,72-0,82 (0,77)	44,5-59,0 (51,7)	37,6-41,5 (39,5)	12,2	93,9
Arcillo-limoso	0,52-0,81 (0,66)	58,9-93,6 (76,2)	38,0-66,6 (52,3)	23,9	157,7
Arcilloso	0,47-1,03 (0,75)	41,7-102,6 (72,1)	28,7-89,9 (46,3)	25,8	193,5
Orden Inceptisol (suelos de Tundra)					
Franco-arenoso	0,77-1,36 (1,06)	11,1-36,8 (23,9)	6,4-24,3 (15,3)	8,6	91,1
Franco-arcillo-limoso	0,85-1,11 (0,98)	25,2-38,8 (32,0)	12,9-23,9 (18,4)	13,6	133,2
Franco-arcilloso	0,91-1,16 (1,03)	31,3-61,2 (46,2)	15,2-40,6 (27,9)	18,3	188,4
Franco-arcillo-arenoso	0,85-1,11 (0,98)	25,2-38,8 (32,0)	12,9-23,9 (18,4)	13,6	133,2
Arcillo-limoso	0,71-1,20 (0,95)	33,3-52,8 (43,0)	23,6-37,4 (30,5)	12,5	118,7
Arcilloso	0,75-1,48 (1,11)	23,6-41,9 (32,7)	14,7-31,8 (23,2)	9,5	105,4
Orden Ultisol (horizonte B con mayor cantidad de arcilla que horizonte A; suelos con bajo nivel de nutrientes)					
Franco-arenoso	1,25	41,2	35,5	5,7	71,2
Franco-arcillo-limoso	0,84	-	-	-	-
Franco-arcilloso	0,84-1,42 (1,13)	25,8-35,9 (30,8)	14,4-19,4 (16,9)	13,9	157,0
Franco-arcillo-arenoso	1,55	30,9	26,8	4,1	63,5
Arcillo-limoso	0,69-0,90 (0,79)	41,9	23,1	18,8	148,5
Arcilloso	0,67-1,41 (1,04)	26,7-45,4 (36,0)	6,8-29,8 (18,3)	17,7	184,0

Rangos de valores promedios para suelos con profundidad entre 0 y 100 cm. (); valores promedios. HA; humedad aprovechable. Fuente: Elaboración propia con datos de CIREN, 2003.

c) Contenido de humedad en el suelo: se refiere a la cantidad de agua presente en un perfil de suelo a una profundidad dada, estrata u horizonte del suelo en un momento determinado. La cantidad de agua puede ser determinada de acuerdo a su contenido de humedad gravimétrica (en base a la masa del agua), humedad volumétrica (en base al volumen del agua), y como lámina de agua:

1.- Humedad gravimétrica (**W**): corresponde a la relación entre la masa de agua (M_w) y la masa de las partículas de suelo seco (M_s). Este parámetro se obtiene secando la muestra de suelo a temperaturas entre 105 a 110°C por 48 a 72 horas, hasta llegar a un peso constante. Así, el contenido de humedad gravimétrica se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$W = \frac{M_w}{M_{ss}} * 100$$

Donde:

W = Contenido de humedad gravimétrica (%)
 M_w = Masa de agua (g)
 M_{ss} = Masa de suelo seco (g)

El contenido de agua es separado del suelo y expresada como la relación entre la masa de agua y la masa de suelo secada en horno. Así, la masa de agua (M_w) se obtiene de la diferencia de peso entre la muestra de suelo húmedo total (M_t) y el peso del suelo seco (M_s). Por ejemplo: un suelo cuya W es de 0.38 o 38%, quiere decir que tiene 0.38 g de agua por un gramo de suelo seco, o que es lo mismo, 38 g de agua en 100 g de suelo seco.

2.- Humedad volumétrica (θ): es otra manera de determinar el contenido de agua. En vez de calcularlo en base a la masa del agua se utiliza la relación entre el volumen de agua y el volumen total del suelo. El contenido de humedad volumétrica se puede determinar utilizando la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} * 100$$

Donde:

θ = Humedad volumétrica (%)
 V_w = Volumen de agua (cm³)
 V_t = $V_a + V_w + V_s$ = Volumen total del suelo (cm³)

El contenido de humedad volumétrica de agua ($q\%$) se puede determinar utilizando el contenido de humedad gravimétrica de un suelo (W), su densidad aparente (ρ_a) y la densidad del agua ($\rho_{agua} \approx 1 \text{ g/cm}^3$), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\theta = W * \frac{\rho_a}{\rho_{agua}}$$

El uso de la humedad del suelo en términos volumétricos es más conveniente que usar el contenido de humedad gravimétrica, debido a que expresa más claramente el volumen de suelo que está ocupado por agua. En otras palabras, dos suelos pueden tener la misma humedad gravimétrica, pero distinto volumen de agua, si las densidades aparentes son diferentes. La determinación de la cantidad de humedad volumétrica en el campo es más compleja, pero actualmente, con los avances tecnológicos, existen equipos que permiten medir de manera directa este parámetro en el suelo.

3.- Contenido de humedad como lámina de agua (H): es una forma de expresar el contenido de humedad de un suelo, pero como una lámina o altura de agua. Esta expresión es de mucha utilidad porque no depende del área y basta multiplicar la humedad volumétrica por la profundidad que se desea considerar:

$$H = \frac{\theta * P_s}{100}$$

Donde:

H = Lámina o altura de agua (mm)
 θ = Humedad volumétrica (%)
 P_s = Profundidad del suelo (mm)

O bien, en esta expresión se puede usar el contenido de humedad gravimétrico (W) y la densidad aparente (ρ_a) de acuerdo a lo siguiente:

$$H = \frac{(W * \rho_a) * P_s}{100}$$

Donde:

H = Lámina o altura de agua (mm)
 W = Humedad gravimétrica (%)
 ρ_a = Densidad aparente (g/cm^3)
 P_s = Profundidad del suelo (mm)

4.2.1.2. Dinámica del agua de riego en el suelo

El movimiento o flujo de agua son gobernadas por un factor *hidráulico*, *gravitacional* y un factor de *capilaridad* del suelo. Sin embargo, en un suelo no saturado el movimiento del agua está gobernado por la conductividad hidráulica y por el efecto de adsorción del agua por el suelo.

4.2.1.2.1. Infiltración del agua en el suelo

El flujo de agua en el suelo comienza con el ingreso de ésta en el perfil por medio de un proceso llamado infiltración, para luego almacenarse temporalmente en la zona de raíces y culminar con la eliminación del agua restante por drenaje, evaporación y absorción por las plantas. El proceso de infiltración del agua en el suelo ocurre en las capas superficiales de éste y por lo general, presenta una dirección vertical descendente.

Cuando llueve el agua puede entrar e infiltrarse en toda la superficie de suelo de manera uniforme, pero también, puede ingresar a través de surcos o acequias de riego. Inclusive, el agua puede ingresar y moverse hacia arriba (contra la gravedad) en el perfil, como ocurre cuando existe una napa freática alta. Así, en casi todos los métodos o sistemas de riego, la velocidad de infiltración (entrada de agua al suelo) determina el tiempo que el agua debe estar pasando por los surcos, goteando o asperjando (tiempos de riego) y los diseños de los sistemas, teniendo en cuenta el tamaño de las unidades superficiales y los caudales a utilizar.

Para un manejo eficiente y eficaz del suelo y del agua, se debe adquirir un conocimiento detallado de este proceso, ya que el proceso de infiltración se correlaciona con las propiedades físicas del suelo y con el aporte de agua al sistema.

Descripción del proceso de infiltración: la infiltración es el proceso donde el agua (de riego o lluvia efectiva) ingresa a la superficie del suelo y entra al subsuelo donde se encuentra la zona de raíces. Mientras que la capacidad de infiltración, es la cantidad de flujo de agua que un perfil de suelo puede absorber a través de la superficie. A su vez, si la velocidad de aporte de agua a la superficie del suelo es menor que la capacidad de infiltración, el agua se infiltra tan rápido como es aportada. Si por el contrario, la velocidad de aporte de agua es mayor que la capacidad de infiltración del suelo, se producen los anegamientos, charcos o posas de agua, afectando el normal desarrollo de las plantas. De esta forma, el proceso completo es controlado por las características físicas del perfil del suelo.

En general, la velocidad de infiltración del agua en el suelo es alta en los primeros estados de infiltración, disminuyendo paulatinamente hasta llegar a una velocidad constante denominada infiltrabilidad básica (velocidad de infiltración estabilizada). Así, la capacidad de infiltración y su variación en el tiempo dependen del tipo de textura,

estructura y uniformidad (una o varias estratas) dentro del perfil de un suelo. De esta manera, suelos con textura arenosa siempre presentan velocidades de infiltración mayores que los suelos con textura arcillosa. Sin embargo, dentro de un mismo suelo la velocidad de infiltración, también, depende del contenido de humedad que tenga, es decir, a mayor contenido de humedad presente en un suelo menor velocidad de infiltración tendrá.

Factores que afectan el proceso de infiltración: los factores que pueden perjudicar la velocidad de infiltración de un suelo son aquellos que afectan las propiedades físicas de éste, tales como; a) sellamiento superficial, b) compactación del suelo, c) grietas presente en el suelo, d) preparación de suelo, e) materia orgánica y rotación de cultivos, f) sedimentos presentes en el agua de riego, g) perfil del suelo (por ejemplo, presencia de una o varias estratas y porcentaje de piedras), entre otros.

Métodos para medir la velocidad de infiltración: las pruebas de velocidad de infiltración deben efectuarse en el mismo lugar donde se pretenden realizar los riegos futuros para obtener valores confiables. Dado que existen muchos factores que inciden en la determinación, incluyendo la variabilidad espacial en campo, las pruebas de velocidad de infiltración deben realizarse en varios puntos del potrero, predio o sector, para minimizar al máximo los posibles errores eliminando los valores anormales.

Para determinar la velocidad de infiltración del agua en un suelo deben considerarse los siguientes aspectos:

- Las mediciones de la velocidad de infiltración del agua en el suelo deben realizarse en un lugar representativo del tipo de suelo existente en el predio y en un lugar cercano a la fuente de agua.
- Realizar un análisis y descripción del perfil del suelo (calicata y laboratorio) para determinar su textura y ver si existen cambios en el perfil (una o varias estratas, piedras, etc.), además, de realizar una descripción de la estructura del suelo. Los primeros 30 cm de profundidad son de particular importancia.
- Determinar la humedad del perfil del suelo, a través de mediciones de velocidad de infiltración con una humedad del suelo aproximada a aquella existente antes de un riego.
- Verificar cualquier característica que pueda influir en la velocidad de infiltración.

Los métodos más utilizados para determinar experimentalmente (en campo) la velocidad de infiltración del agua en el suelo se encuentran:

➤ El cilindro infiltrómetro doble:

Es probablemente, la herramienta más usada en el estudio de la velocidad de infiltración del agua de un suelo, principalmente, para sistemas de riego localizado (goteo). Para usar éste método, se emplea un cilindro de 25 a 30 cm de diámetro y 30 a 40 cm de altura y otro cilindro de 55 a 65 cm de diámetro y de 20 a 30 cm de altura. Estos se instalan en forma concéntrica (Foto 23), donde en el cilindro interior se realizan las mediciones y el cilindro exterior es utilizado para evitar el flujo radial del agua durante la prueba de infiltración. Por su parte, la instalación de los cilindros en terreno debe ser cuidadosa, de tal modo de evitar alteraciones en el suelo que distorsionen las medidas de infiltración. Al no tener los cilindros se puede medir la velocidad de infiltración construyendo una poceta en el suelo de alrededor de 1 m² (Figura 27).



Foto 23. Cilindro infiltrómetro doble y sus partes (Castaño et al., 2008).

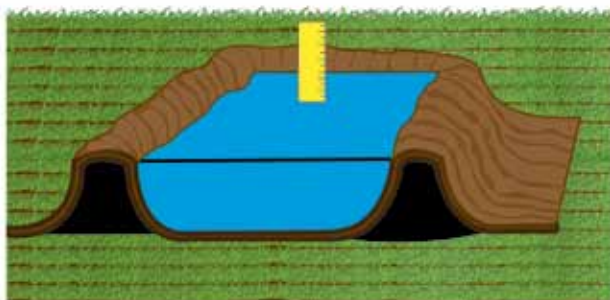


Figura 27. Esquema de la poceta en el terreno (López-Olivari, 2014).

Para realizar las pruebas de infiltración con el método del cilindro infiltrómetro doble se requieren los siguientes materiales: baterías de cilindros (5 cilindros dobles), un trozo de madera, un combo, una regla graduada en cm y mm, cronómetro, pala, balde, un trozo de plástico y una hoja para hacer los registros de los datos.

➤ Surco infiltrómetro:

A diferencia del cilindro infiltrómetro, el surco infiltrómetro determina la velocidad de infiltración por medio de la medición de los caudales de entrada y salida del agua que escurre a través de un surco. La diferencia entre estos caudales se puede considerar una representación de la infiltración del agua en un suelo, en un determinado tiempo. Así, una parte del suelo sólo se encuentra en contacto con el agua, en donde la infiltración total del terreno regado depende tanto de la infiltración vertical como de la infiltración lateral entre surcos consecutivos.

El método del surco infiltrómetro sólo entrega valores promedios de un rango de infiltración, lo cual se adapta únicamente a las condiciones de infiltración que existen en un surco de riego, y no permite usar los valores obtenidos en cualquier otro método de riego. Lo anterior, porque el método se utiliza para determinar la velocidad de infiltración de un tipo de suelo en cultivos que se riegan por surcos (Foto 24).



Foto 24. Canoa de aforo Parshall para determinar el caudal de agua al inicio y final del surco en un cultivo de frambueso (López-Olivari, 2014).

Generalmente no se dispone de esta información, por lo que puede considerarse como referencial las curvas que se muestran en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Curvas de velocidad de infiltración “referenciales” para algunas series de suelo de la región de La Araucanía.

Curva característica: $VI = K \cdot T^n$ Donde: VI es la velocidad de infiltración (mm h ⁻¹). K es la VI en el primer minuto. n es la pendiente de la curva. T es el tiempo (horas).				
Serie de suelo	Textura dominante	K	n	VI _{básica}
Mininco	Franco arcillosa	25,18	-0,2005	8,9
Tijeral	Franco limosa	22,99	-0,1837	8,8
Victoria	Franco arcillosa	25,34	-0,2280	7,8
Perquenco	Franco arcillosa limosa	48,69	-0,2620	12,5
Pemehue	Franco limosa	96,74	-0,3535	24,3
Santa Bárbara	Franco limosa	140,59	-0,2062	5,0
Temuco	Franco limosa	59,78	-0,4600	5,5
Vilcún	Franco limosa a franco arcillosa	17,65	-0,1940	6,4
San Patricio	Franco limosa	74,28	-0,3534	11,4
Nueva Imperial	Franco limosa a franco arcillosa	14,32	-0,3387	2,4
Metrenco	Franco arcillo limosa	57,15	-0,3518	9,2
Freire	Franco limosa	25,16	-0,2424	7,1
Agua Fría	Franco limosa a franco arcillosa	42,46	-0,2028	14,8
Barros Arana	Franco limosa	6,607	-0,3108	1,3

Fuente: Elaboración propia con información de CIREN, 2002 y Quiroga, 1987. Comunicación personal Edmundo Varas, 2015.

4.2.1.2.2. Disponibilidad de agua en el suelo

La disponibilidad de agua en el suelo se ve afectada por muchas fuerzas, pero principalmente, por; a) gravedad; y b) presión hidrostática y atmosférica. Estas fuerzas originan la adsorción del agua (retención del agua en la superficie de las partículas por fuerzas eléctricas) de forma temporal en las partículas del suelo. Así, según la fuerza

existente, el agua puede ser distribuida de un punto a otro dentro del perfil de suelo, puede drenar, fluir a la superficie y ser evaporada, o que el agua se desplace hacia las raíces de las plantas y sea eliminada hacia la atmósfera como transpiración. Así, si el agua del suelo está a una presión hidrostática mayor que la atmosférica el potencial de presión (Ψ_p) es positivo (condición de suelo saturado). Por el contrario, si la presión hidrostática es menor que la atmosférica el Ψ_p es negativo (tensión o succión) y se habla de potencial matricial (Ψ_m) (condición de suelo no saturada).

Por otro lado, la fuerza (Ψ_m) con que el agua es retenida por el suelo dependerá de la cantidad de agua presente en el sustrato. Así, mientras más seco está el suelo, mayor es la fuerza de retención de esta agua y más es el esfuerzo que debe realizar la planta para absorberla. Por el contrario, si el suelo está muy húmedo, parte del agua no puede ser retenida y se infiltra en profundidad.

En este contexto, existen tres niveles de humedad en el suelo que son: “Saturación”, “Capacidad de Campo (CC)” y “Punto de Marchitez Permanente (PMP)”. La diferencia entre CC y PMP definen lo que se conoce como “humedad aprovechable del suelo (HA)”. A continuación se explica cada uno de estos niveles de humedad:

a) Saturación: el nivel de saturación se puede observar inmediatamente después de una lluvia o un riego. Un suelo se encuentra saturado cuando todos los poros se hayan ocupados por agua desplazando al aire del suelo. Así, cualquier cantidad adicional de agua que se aplique va a escurrir provocando un encharcamiento o movilidad hacia las capas más profundas del suelo por efecto de la gravedad. Si un suelo saturado de agua drena de manera natural, el contenido de humedad de ese suelo comienza a descender vaciándose primero los poros de mayor tamaño y desplazando el aire existente en ellos. Esta agua eliminada se denomina agua libre o gravitacional, que no es retenida por el suelo. Así, un suelo en estado de saturación el potencial mátrico es cero.

b) Capacidad de campo (CC): es el contenido de agua retenida por un suelo después de haber sido mojado en abundancia por riego o lluvia y el excedente de agua haya drenado libremente. Normalmente, esta condición se obtiene entre dos a tres días después de una lluvia o riego en suelos permeables, y de estructura y textura uniforme. El concepto de CC es un criterio práctico y útil, donde se considera como el límite superior del almacenamiento de humedad útil por parte de la planta, o humedad aprovechable (HA). Así, en un suelo a CC, el agua se encuentra retenida por un potencial de energía o fuerza, equivalente a 1/3 de atmósfera o bar (1 bar = 1 atmósfera = 10 m columna de agua). A -0,33 atmósferas un suelo arenoso puede retener un poco más de 5% de humedad, mientras que en un suelo arcilloso puede alcanzar una humedad cercana al 50%. De esta manera, un suelo a CC es la condición de humedad más adecuada para el desarrollo de las plantas, en donde el agua queda retenida en los capilares o espacios que existen entre las partículas del suelo y en estas condiciones el agua puede ser absorbida por las plantas con mayor facilidad.

La CC normalmente se expresa en porcentaje (%), y se puede obtener con métodos de laboratorio o en terreno. Para determinar el contenido de humedad en laboratorio, lo más común es utilizar una olla de presión, en donde una muestra de suelo disturbada se satura en agua para luego aplicar una presión de -0,33 bares. Considerar que este método no siempre representa lo que sucede en terreno porque las muestras de suelo que se analizan están disturbadas, es decir, se ha destruido su estructura. Así, para determinar este valor en terreno, se debe realizar un pretil de 2 x 2 metros e inundar con agua hasta mojar todo el perfil de suelo hasta un 1 metro por ejemplo. Una vez que el agua se infiltra en el suelo, se cubre con plástico para evitar que el agua se evapore y cuando ha transcurrido 2 a 3 días se colectan muestras de suelo a distintas profundidades o por estrata, si es que hubiese más de una en el perfil, para luego obtener la humedad a CC. Los diferentes porcentajes o valores de humedad de un suelo a CC pueden ser gravimétricos (W_{cc}) o volumétricos (θ_{cc}).

Recordar que los valores del contenido de humedad a CC se afectan por la clase textural que presenta un suelo, el contenido de materia orgánica, la presencia de diferentes estratas en el perfil de suelo y el porcentaje de piedras.

c) Punto de marchitez permanente (PMP): de manera sencilla se puede definir como la cantidad de agua que presenta un suelo a un nivel tal que las raíces de la planta no pueden extraer y absorber esa agua, pudiendo presentar síntomas de marchitez irreversible y morir. Lo anterior se produce porque el contenido de agua existente en el suelo puede descender a consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas, donde las películas de agua que rodean a las partículas de suelo se hace cada vez menor, disminuyendo el contenido de humedad y haciendo más difícil la absorción de agua por las raíces. Así, el concepto de PMP se considera el límite inferior de almacenamiento de agua útil en el suelo por parte de las plantas, en la cual en esta condición, las raíces de las plantas absorben el agua del suelo con mucha dificultad y experimentan una marchitez irreversible. El estado de PMP no sólo depende de la humedad del suelo, sino que también, de las condiciones meteorológicas, densidad de raíces, condiciones osmóticas de la solución del suelo, etc. Cuando un suelo se encuentra en PMP, el agua se encuentra retenida con un potencial de energía o fuerza equivalente a -15 atmósferas o bares. En tal condición, a la planta le cuesta mucho absorber el agua y si no se provee de agua oportunamente, la planta puede morir. Al igual que el contenido de humedad a CC la condición de PMP se expresa en porcentaje (%). Un suelo con clase textural arenosa en un estado de PMP puede contener menos de un 5% de humedad, en cambio, en un suelo con clase textural arcillosa puede contener un 20% o más de humedad. Los diferentes porcentajes o valores de humedad de un suelo a PMP pueden ser gravimétricos (W_{PMP}) o volumétricos (θ_{PMP}).

Cabe recordar que los suelos del sur de Chile contienen un mayor porcentaje de materia orgánica (MO), lo cual incide directamente en los valores de W_{CC} y W_{PMP} . Así, estos suelos pueden almacenar agua (humedad aprovechable) aproximadamente 2 a 3 veces más que un suelo mineral (bajo contenido de MO). En el Cuadro 20 se muestra un ejemplo donde un suelo con la misma clase textural, pero uno con poca MO y el otro con mayor cantidad MO almacenan diferentes cantidades de humedad.

Cuadro 20. Comparación de una misma clase textural de suelo de dos localidades diferentes.

Clase Textural	MO (%)	ρ_a (g/cm ³)	% Arena	% Limo	% Arcilla	W_{CC} (%)	W_{PMP} (%)	HA (%)
Franco arenoso (Pelleco, Región de Los Lagos)	21,5	0,63	62,0	30,9	7,1	62,4	40,1	22,3
Franco arenoso (Colbún, Región del Maule)	5,48	1,24	72,0	21,0	7,0	15,6	7,4	8,3

d) Humedad aprovechable (HA) o agua disponible total (ADT) del suelo: es el contenido de agua retenida en el suelo que un cultivo puede extraer entre CC y PMP, y cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular. Así, HA o ADT es mayor en suelos con clase textural arcillosa que en los de clase textural arenosa.

Generalmente, no toda la humedad aprovechable del suelo está disponible para las raíces de las plantas, por lo cual es necesario regar cuando se agota un porcentaje de la HA o ADT evitando que se produzca un estrés hídrico. Así, la fracción de HA o ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable (AFA) en el suelo. Esta fracción se denomina “Umbral de riego, fracción de agotamiento o criterio de riego” y depende del tipo de suelo, sensibilidad del cultivo al déficit hídrico y de la evapotranspiración (Gráfico 10). El umbral de riego (UR) se expresa en porcentaje (%), señalando el porcentaje de agua de la humedad aprovechable que puede ser consumida antes de volver a realizar un nuevo riego. Algunos valores de UR referenciales se encuentran en el Cuadro 21.

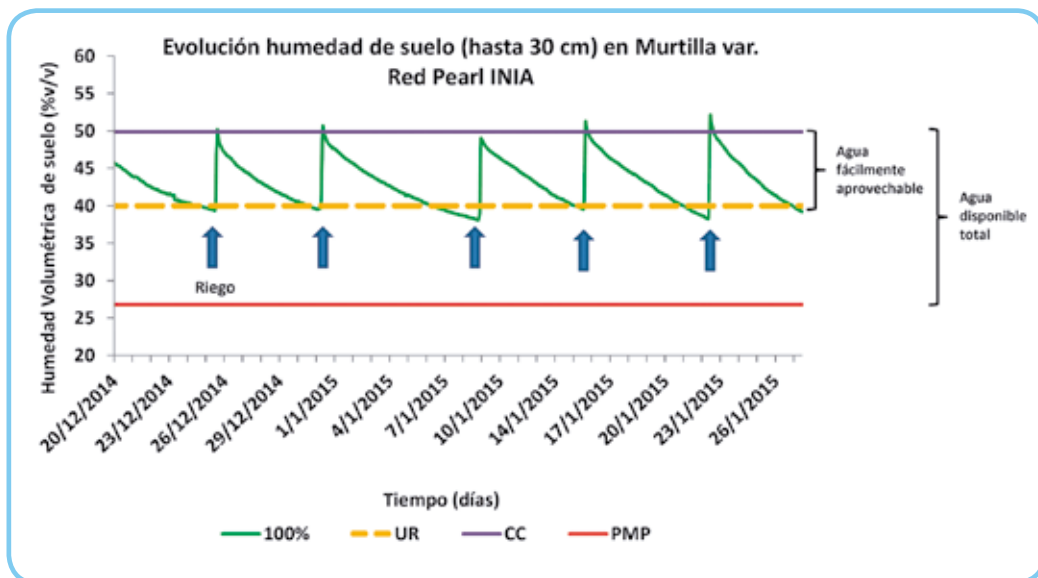


Gráfico 10. Valores de humedad del suelo (%v/v) en un cultivo de Murtilla durante una temporada de riego y la representación conceptual del agua disponible total (ADT) y fácilmente aprovechable (AFA) por las plantas, y el umbral de riego.

Cuadro 21. Umbrales o criterios de riego referenciales para diferentes cultivos, hortalizas, praderas y frutales.

CULTIVO	CRITERIO DE RIEGO (%)
HORTALIZAS	
Lechuga	30
Espinaca	20
Zanahoria	35
Brócoli	45
Ajo	30
Cebolla	30
Cebolla Semilla	35
Pimentón	30
Melón y Sandía	40
Tomate	40
TUBÉRCULOS	
Papas	35
Camote	65
Remolacha	55
LEGUMINOSAS DE GRANO	
Porotos	45
Garbanzo	50
Lenteja	50
Arvejas frescas	35
Arvejas secas	40
Poroto soya	50

Fuente: Allen et al., 1998

CULTIVO	CRITERIO DE RIEGO (%)
HORTALIZAS PERENNES	
Alcachofa	45
Espárrago	45
Frutilla	20
CEREALES	
Cebada	55
Avena	55
Trigo	55
Maíz Grano	55
Maíz Dulce o para Silo	50
Sorgo grano	55
PRADERAS	
Alfalfa para heno	55
Alfalfa para semilla	60
Trébol para heno	50
FRUTALES Y VIÑAS	
Vid de mesa	35
Vid de vino	45 –60
Citricos	50
Almendro	40
Manzanas , y Peras	50
Damascos, Durazneros , Ciruelos Cerezas	50
Kiwi	35
Olivos	65
Nogal	50

La cantidad de agua fácilmente aprovechable (AFA) o, también llamada, lámina neta (Ln) por la planta se puede estimar usando la siguiente expresión:

$$AFA = ADT * \frac{UR}{100}$$

Donde:

ADT = Agua disponible total o capacidad de estanque del suelo (mm)

UR = Umbral de riego o criterio de riego (%)

Mientras que la humedad aprovechable total (HA) puede ser descrita como:

$$HA = \frac{W_{CC} - W_{PMP}}{100} * \rho_a$$

Donde:

W_{CC} = Contenido gravimétrico de agua en el suelo a capacidad de campo (%)

W_{PMP} = Contenido gravimétrico de agua en el suelo a punto de marchitez permanente (%)

ρ_a = Densidad aparente del suelo (g/cm³)

Si los valores de CC y PMP se encuentra como contenido de humedad volumétrica (θ_{CC} y θ_{PMP}) de agua, NO es necesario multiplicar la diferencia ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$) por la densidad aparente (ρ_a). Finalmente, ADT puede ser determinado utilizando la siguiente ecuación:

$$ADT = HA * P_s * \left(1 - \frac{\% Pied}{100}\right) * FSM$$

Donde:

P_s = Profundidad efectiva de raíces (mm)

$\%Pied$ = Porcentaje de piedras presentes en el perfil de suelo (%)

FMS = Fracción de suelo mojado por los emisores de riego.

(FSM se asume entre 0,4 y 0,6 para riego por goteo o microaspersión)

(FSM se asume 1 para riego gravitacional y aspersión)

En suelos que presentan más de una estrata en el perfil con diferente clase textural, el cálculo de AFA se realiza de manera independiente para cada estrata según las características físicas. Una vez que se hace el cálculo por estrata, los valores deben sumarse para tener el agua disponible del perfil de suelo considerado. Además, considerar la profundidad de cada estrata hasta llegar a la profundidad efectiva de raíces.

4.2.2. Información de planta y clima

Las necesidades de agua de las plantas también dependen de las condiciones ambientales y climáticas que la rodean. En este sentido, es necesario saber cuáles son los requerimientos o el consumo hídrico de los cultivos y frutales. Para determinarlo, aparte de la información de suelo, hay que interaccionar la información de planta derivado principalmente por el coeficiente de cultivo (K_c) y de las variables climáticas entregadas por una estación meteorológica automática (EMA). Así, con las variables que mide la EMA se puede determinar la evapotranspiración de referencia (ETo), que multiplicado por K_c permite calcular el consumo de agua por parte de los cultivos y frutales (Etc). Estos conceptos se explicarán con mayor detalle en este ítem.

4.2.2.1. Consumo de agua por las plantas

Las plantas requieren de agua para crecer y desarrollarse. Así, cuando existe agua en el suelo, ésta fluye a la atmósfera transportando los nutrientes esenciales hacia la planta. Luego, el agua sale por los estomas de las hojas (transpiración), donde ingresa en el mismo momento moléculas de CO_2 , que junto a la radiación solar hacen posible el proceso de fotosíntesis. Este proceso permite que las plantas tomen dichos elementos (CO_2 , agua, nutrientes, luz y agua) y los transformen en biomasa (frutos, hojas, tallos y raíces), es decir, la pérdida de agua que se produce es el costo que debe pagar la planta para producir su alimento. La pérdida de esta agua puede ser suplida por las lluvias efectivas o a través del flujo de agua capilar desde las napas freáticas superficiales. Si estos aportes de agua son insuficientes, o no está disponible durante el crecimiento y desarrollo de la planta, se debe aplicar el agua de forma artificial a través del riego.

4.2.2.1.1. Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración (ET) es un proceso que tiene lugar en la relación cultivo-suelo, donde el agua se pierde a la atmósfera y que a su vez el cultivo necesita recuperar para su óptimo crecimiento y desarrollo. Así, la ET representa la suma de dos fenómenos por separados que ocurren simultáneamente; a) la **transpiración** que es el agua evaporada desde la superficie de las partes verdes de un cultivo (principalmente desde las hojas), y b) la **evaporación** de agua que se produce desde la superficie del suelo (Figura 28).

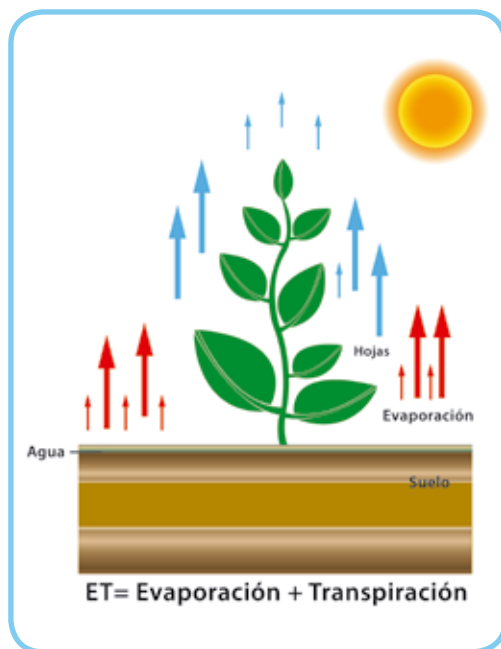


Figura 28. Esquema del proceso de evapotranspiración en un sistema cultivo-suelo (López-Olivari, 2014).

El movimiento de agua del estado líquido a gaseoso (vapor de agua) ocurre tanto en la transpiración como en la evaporación, donde se requiere una fuente de energía que es proporcionada por la radiación solar directa, diferencia de presión de vapor existente entre la superficie del suelo u hoja y el ambiente circundante. El viento es otro factor importante, éste mezcla las capas de aire que contienen mayor vapor de agua con otras que contienen menos, impidiendo de esta manera que las capas de aire muy cercanas a la superficie del suelo u hoja se saturen de vapor de agua, evitando que se detenga el proceso de ET. Dicho factor puede ser muy relevante en la zona sur de Chile, donde la velocidad e intensidad de los vientos pueden eliminar más rápido y más veces en el tiempo estas capas de aire de la superficie de las hojas, provocando un grado de deshidratación adicional en las plantas e incrementado aún más el proceso de ET. Sin embargo, la temperatura no afecta directamente la ET, pero se puede usar como un indicador de la cantidad de radiación solar directa que existe, pudiendo saber que en los meses de mayor radiación solar directa también hay temperaturas más altas. Por otro lado, humedades altas en el ambiente que rodea una planta, próximas a saturación, pueden disminuir la ET e incluso inhibir la absorción de nutrientes, como también influir en la aparición de enfermedades. En el momento de siembra de los cultivos de cobertura total (cereales, praderas, entre otros), casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal cubre completamente el suelo, más del 90% de la ET ocurre como transpiración.

La cantidad de agua perdida por transpiración de las plantas es mucho mayor a la cantidad de agua que pueden retener en su interior para su crecimiento y fotosíntesis. Así, la transpiración puede considerarse como el consumo de agua que necesitan las plantas. Sin embargo, ambos procesos (transpiración y evaporación) se estiman de manera conjunta, ya que es muy difícil determinar éstas por separado.

El estudio de la evapotranspiración (ET) sirve para determinar las necesidades hídricas de los cultivos, programar los riegos para alcanzar una eficiencia óptima, diseñar sistemas de riego y embalses, gestión hídrica (costos/beneficios) y mano de obra, entre otras.

El proceso de evapotranspiración, en la mayoría de los casos, se expresa en mm de altura de agua evaporada y transpirada por unidad de tiempo. Es decir, en cada hora (mm/h), en cada día (mm/día) o en cada mes (mm/mes), y la cantidad de agua que se pierde varía según el clima y el tipo de cultivo.

Transpiración: es un proceso donde existe una pérdida de vapor de agua sobre la superficie de las hojas. Esta eliminación del vapor de agua se produce a través de los estomas (poros muy pequeños) que se encuentran, principalmente, en la epidermis de las hojas (Figura 29). La radiación solar directa (luz visible u otras formas de energía radiante), tiene un efecto sobre la apertura y cierre de los estomas presentes en las hojas. Sin embargo, si la luz solar desaparece los estomas presentes en las hojas tienden

a cerrar, deteniendo el proceso de transpiración. Actualmente, existe evidencia que hay movimiento o flujo de agua en la noche dentro de las plantas, pero no se sabe de manera cierta, si se trata de transpiración o rehidratación de la planta.

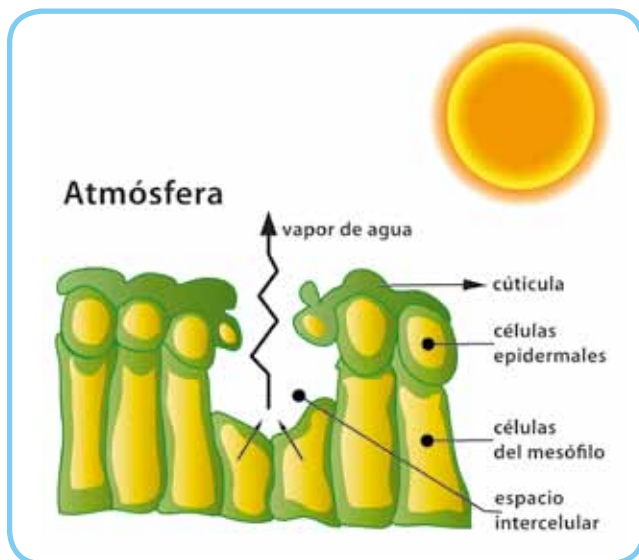


Figura 28. Esquema de la pérdida de vapor de agua desde un estoma, dando lugar al proceso de transpiración.

La humedad relativa (presión de vapor del agua en la atmósfera) también afecta la transpiración. Entre más alta es, menor paso de agua se produce por los estomas (el ambiente cercano a la hoja se encuentra con mayor vapor de agua). La temperatura está directamente relacionada con la presión de vapor existente en los órganos de la hoja y la atmósfera circundante a la planta. Así, a mayor temperatura menor es la presión de vapor de agua, aumentando la transpiración. El viento eleva el gradiente de presión de vapor a través de los estomas y en consecuencia, incrementa la transpiración. Para que sea posible la pérdida de agua, las raíces de la planta tienen que haber absorbido agua desde el suelo. De esta manera, ambos procesos de absorción y transpiración son esenciales para la sobrevivencia de las plantas.

Por otro lado, si la planta presenta un mayor desarrollo de su follaje (mayor área foliar o de hojas), mayor es la pérdida de agua producida en el proceso de transpiración. Lo anterior ocurre porque, el área foliar va en aumento a medida que la temporada de crecimiento del cultivo y frutal de hoja caduca transcurre, incrementando el número de estomas por superficie (mayor transpiración).

Muchos autores han atribuido dos funciones principales al proceso de transpiración en las plantas:

Efecto refrigerante: algunos autores indican que la transpiración producida sobre las plantas evita un sobrecalentamiento de ellas. Este efecto refrigerante ocurre porque al pasar el agua del estado líquido a gaseoso, se libera una cantidad de energía que provoca un rápido enfriamiento en las hojas.

Efecto sobre el crecimiento y desarrollo: por efecto de la transpiración se produce el movimiento del agua desde el suelo a la planta, lo cual transporta una cantidad de nutrientes contenidos en el suelo. Así, la transpiración es un factor clave en el ascenso del agua a través del xilema y en la distribución de los nutrientes en la planta, lo cual interviene directamente en el crecimiento y desarrollo de éstas.

Evaporación: el proceso de evaporación del agua desde la superficie del suelo contiguo a las plantas, ya sea el agua depositada por el rocío y/o la lluvia ocurre de manera conjunta con el proceso de transpiración de las plantas.

4.2.2.1.2. Factores que afectan el consumo de agua por las plantas

El consumo de agua por parte de los cultivos y frutales depende en gran parte de factores como clima, suelo, los mismos cultivos y frutales, y el manejo agronómico. A continuación se describen estos factores:

a) Clima: es uno de los componentes que más varía en el tiempo, que hace cambiar los valores de ET durante la temporada agrícola. Cuando los días son nublados, lluviosos y húmedos los valores de ET tienden a ser más bajos, mientras que en días con alto sol, secos y con abundante viento los valores de ET tienden a ser más altos. De esta manera los parámetros climáticos más relevantes se describen a continuación:

Radiación Global (Rs): motor principal de energía. Hace posible los procesos físicos de la atmósfera, interviene en todos los fenómenos relacionados a la producción de biomasa, como también, entrega la energía necesaria para el proceso de evaporación del agua desde la superficie terrestre, condicionando la distribución de los valores de temperatura.

Luz: tiene un rol clave en algunos procesos que ocurren en la planta, como es la fotosíntesis. En ausencia de luz las hojas de las plantas cierran los estomas para evitar la pérdida de agua. De esta manera, una planta expuesta a la luz puede abrir los estomas, haciendo posible la entrada de CO₂ y salida del vapor de agua para realizar el proceso de fotosíntesis y producir biomasa.

Humedad del aire (HR): interviene en el balance del agua interno de las plantas, limitando el fenómeno de transpiración. Bajo un concepto agrometeorológico, la humedad se

expresa como presión de vapor. En este sentido, un parámetro importante es el déficit de saturación, es decir, la diferencia entre la presión de vapor de agua saturado y la presión de vapor real del aire a la temperatura en que se encuentra el aire. Así, La HR expresa la relación que existe entre estos dos conceptos expresado en porcentaje (%).

Déficit de presión de vapor (DPV): cuando se crea un contacto entre la planta y el ambiente (atmósfera) se forma una diferencia de presión de vapor. Este gradiente provoca un flujo de vapor desde una atmósfera saturada de humedad (cavidad bajo los estomas de las hojas; HR cerca al 100%) a una atmósfera insaturada de humedad ($HR < 100\%$). Esta diferencia de presiones de vapor hace posible un flujo de vapor de agua desde los estomas de la planta (mayor presión de vapor) hacia la atmósfera (menor presión de vapor). Es decir, entre más alta es la diferencia de presión de vapor, el ambiente está más seco y por ende, hay un mayor flujo de vapor de agua desde el cultivo hacia la atmósfera. Así, se puede decir que el DPV se relaciona a la sensación térmica que existe en el ambiente en un período determinado.

Temperatura (T): factor que interviene fuertemente tanto en las reacciones físico-químicas como en las actividades biológicas de las plantas para la producción de biomasa. También, la T influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas (ciclo fenológico), y determina de alguna forma el contenido de vapor de agua presente en el ambiente y el proceso de evaporación. Así, la T presenta un efecto sobre la apertura y cierre de los estomas y los gradientes de presión de vapor. En este contexto, existe una relación directa entre 0 y 30°C de temperatura y la apertura del estoma. Así, una T de 0°C los estomas no se abren, pero incrementará la apertura hasta llegar a los 30°C o más. Lo mismo ocurre con la presión de vapor, donde un aumento de T genera una mayor diferencia de presión de vapor de agua entre el ambiente y la hoja. Por tal razón, la intensidad de la transpiración tiene un ritmo dentro del día, siendo mayores los valores de transpiración cercanos al mediodía y más bajos en la medianoche.

Viento: la velocidad del viento presenta un gran efecto sobre la transpiración, porque afecta el gradiente de presión de vapor que existe entre la cavidad ubicada bajo los estomas de la hoja y una pequeña capa de aire inmóvil pegada a la superficie de la hoja. Según la velocidad e intensidad del viento, la pequeña capa de aire puede disminuir el espesor, lo que conlleva a una mayor o menor velocidad de transpiración o pérdida de agua por parte de la planta, especialmente, en climas secos y calientes. El factor del viento, como se ha estado enfatizando en este documento, puede ser una variable de peso en la determinación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) en el sur de Chile.

Precipitación: este parámetro afecta la ETc desde un punto de vista práctico, ya que las plantas absorben el agua contenida de las reservas hídricas proporcionadas por las lluvias lo que modifica en parte las prácticas del riego, como son la programación del riego (Frecuencias y tiempos de riego).

b) Estado fenológico del cultivo: el período de crecimiento y desarrollo del cultivo o frutal se representa por el coeficiente de cultivo (K_c), el cual engloba la evolución del área foliar y fracción de cubrimiento del suelo por el follaje en el tiempo. Fundamentalmente, el K_c depende del ciclo fenológico del cultivo o frutal, de la localidad, de la variedad y régimen de riego previo. En este contexto, los cultivos consumen más agua cuando el crecimiento del follaje es máximo, y consumen menos a comienzos (siembra y germinación) y finales del período vegetativo (maduración y senescencia) cuando el área foliar es más bajo.

c) Profundidad radicular: con este componente se establece la cantidad de agua que las raíces del cultivo o frutal pueden extraer desde el perfil del suelo. Como regla general aproximada, se puede asumir que los cultivos o frutales extraen alrededor del 40% del agua desde el primer cuarto de raíces, el 30% del segundo cuarto, el 20% del tercer cuarto y el 10% del último cuarto. Si el suelo no es tan profundo, menor es el volumen de suelo que las raíces pueden explorar y disminuye también el patrón de extracción del agua. Por esta razón, es más recomendable usar el concepto de “*profundidad de raíces efectivas*”, es decir, la profundidad en donde se encuentran las raíces que están más activas (raicillas) para absorber el agua desde suelo (cerca de un 70% de la profundidad total de raíces).

d) Manejo agronómico: un manejo agronómico apropiado en riego, fertilización, control de la salinidad, manejo fitosanitario, otros, presentará una evapotranspiración de cultivo máxima, lo cual se puede traducir en una óptima producción agrícola y una alta rentabilidad y retorno económico.

4.2.2.1.3. Evapotranspiración de referencia (ET_o)

Como su nombre lo indica, la ET_o corresponde a la cantidad de agua transpirada por una cobertura vegetal bajo una superficie de referencia. La superficie de referencia implica un cultivo hipotético de pradera (alfalfa o festuca), similar a una superficie extensa de pradera verde en crecimiento activo. Debe tener una altura uniforme entre 8 y 15 cm, cubrir completamente el suelo, y presente un óptimo manejo agronómico (bien regada, buen estado sanitario y de fertilidad). Si se cumplen estas condiciones la ET_o va a depender sólo de las condiciones climáticas o atmosféricas predominantes (Cuadro 22).

El valor de ET_o se puede obtener de los registros que realizan los diferentes sensores incorporados en las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs). Éstas, disponen de equipos que miden la radiación solar (R_s), temperatura (T) y humedad relativa (HR), precipitaciones (P_p), velocidad (U) y dirección del viento (W) (Foto 25), que luego son recolectados en un almacenador de datos. Los valores de ET_o que registran las EMAs pueden ser adquiridas desde la página web <http://agromet.inia.cl>. Además, en este sitio web se puede encontrar información climática generada por una red de más de 200 EMAs distribuidas en diferentes zonas geográficas de Chile. Más de 40 EMAs se encuentran repartidas desde la Región de La Araucanía hacia el sur de Chile. Por otro lado, para que no se confunda, las EMAs poseen sensores que miden y registran variables climáticas, pero **NO** entregan información del pronóstico del tiempo.

Cuadro 22. Valores “referenciales” de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y precipitación efectiva promedio mensual para diferentes distritos agroclimáticos de la región de La Araucanía.

Agroclima	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Total
Angol									
ET _o (mm)	48.9	82.6	97.3	134.1	153.2	128.3	111.5	51.1	807,0
Precipitación efectiva (mm)	24.9	11.6	2.6	15.4	0.7	1.1	8.0	19.5	83,8
Carillanca									
ET _o (mm)	47,6	78,3	93,2	123,7	140,9	115,5	95,2	45,3	739,6
Precipitación efectiva (mm)	34.1	6.3	1.0	11.6	3.1	2.7	4.8	14.7	78,3
Loncoche									
ET _o (mm)	50.1	82.2	94.6	123.1	136.7	106.0	91.0	44.8	728,5
Precipitación efectiva (mm)	66.0	28.8	6.3	36.3	6.7	5.1	15.0	44.2	208,4
Vilcún									
ET _o (mm)	53.3	75.3	89.2	114.3	134.4	105.0	85.9	44.8	702,2
Precipitación efectiva (mm)	27.3	10.7	23.7	20.2	19.6	9.6	20.7	33.6	165,4
Pto. Saavedra									
ET _o (mm)	44.8	69.2	85.6	108.6	116.9	93.1	76.8	41.9	636,9
Precipitación efectiva (mm)	18.9	16.3	14.1	18.2	11.1	9.4	8.9	15.2	112,1



Foto 25. Estación meteorológica automática (EMA) en condiciones de referencia más los sensores y variables que la componen (adaptado de CITRA, 2014).

Los datos meteorológicos no sólo son usados en la determinación del consumo de agua de las plantas, sino también en dar algunas otras soluciones tecnológicas a los agricultores y en otras áreas donde pudiesen adoptarse. Brevemente, se resumen estos otros usos o soluciones que puede entregar la información meteorológica aportada por las EMAs para la toma de decisiones, tales como soluciones en: a) Meteorología, b) Agricultura, c) Crecimiento y fenología (unidades térmicas), d) Monitoreo ambiental, e) Programación del riego, entre otras aplicaciones.

Pero, la mayor utilidad se orienta al uso de modelos predictivos en manejo de enfermedades, predicción de plagas, monitoreo de heladas radiativas, estimación de curvas de crecimiento, manejo hídrico, momento de aplicación de herbicidas y fungicidas, etc. Un ejemplo concreto, es el “Sistema de Alerta Temprana del Tizón Tardío de la Papa” (<http://tizon.inia.cl>) elaborado entre INIA-Remehue y el Consorcio Papa Chile S.A., donde se usa la información de las EMAs para predecir el tizón tardío de la papa como una herramienta de toma de decisiones para el agricultor.

4.2.2.1.4. Coeficiente de cultivo (K_c)

Aparte de conocer las características físicas del suelo y las condiciones climáticas de la zona para calcular las necesidades hídricas se hace indispensable conocer las características de los cultivos, hortalizas, praderas y frutales. En tal sentido, la arquitectura y el estado de crecimiento y desarrollo (fenología) del cultivo o frutal, son principalmente, los puntos claves a considerar. En este contexto, las plantas presentan características propias y pueden estar relacionadas con la resistencia que ejercen las raíces al flujo de agua, la resistencia que presentan los estomas de las hojas a la pérdida de agua, a la arquitectura de la planta (altura, rugosidad y área foliar), y la fracción de cubrimiento que puedan presentar en el suelo. Dichas características varían durante la temporada de crecimiento y desarrollo de las plantas. Todos estos factores lo engloba el **coeficiente de cultivo (K_c)**, lo cual lo hace distinto y variable para cada especie durante el ciclo de vida del mismo.

El coeficiente de cultivo (K_c), se puede expresar de otra manera, donde se describe cómo varía la cantidad de agua que las plantas absorben desde el suelo a medida que se desarrolla entre la siembra y la cosecha (Figura 30).

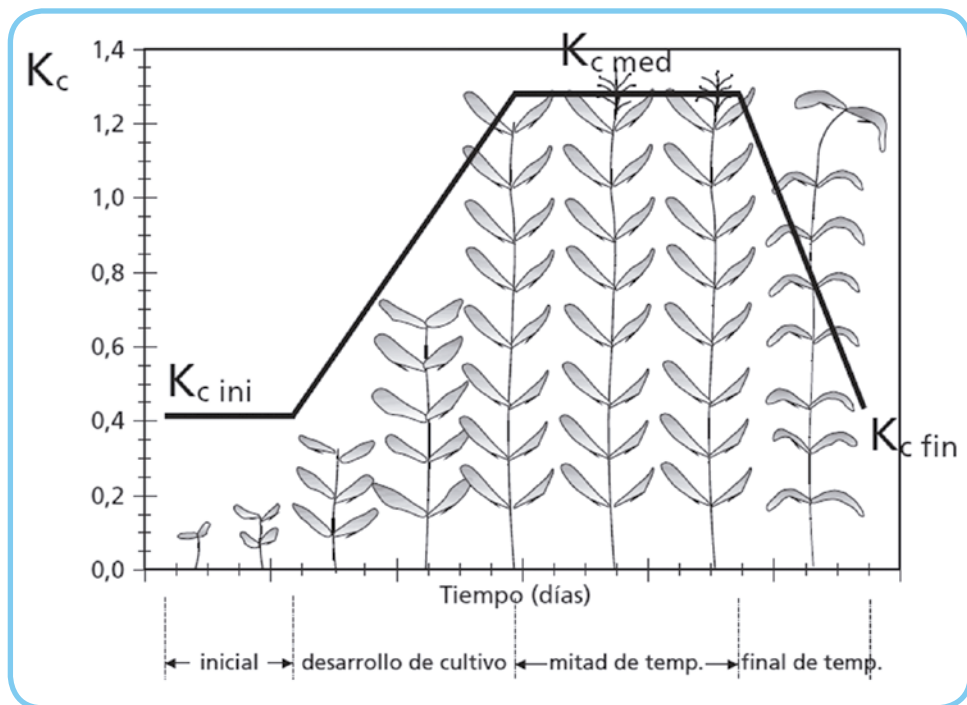


Figura 30. Curva generalizada del coeficiente del cultivo (K_c) para cultivos anuales y frutales de hoja caduca (hojas que se caen en otoño). Fuente: Allen et al., 1998.

Los valores de K_c para cultivos anuales, perennes y frutales de hoja caduca comienzan siendo pequeños porque la planta aún no germina o brota, por lo cual la evaporación del agua desde la superficie del suelo es alta y afecta directamente el valor de K_c . Cuando las plantas empiezan a crecer, gradualmente el valor de K_c se incrementa, debido a la mayor fracción de cobertura del suelo por parte del follaje. Los valores máximos de K_c se alcanzan en el período cercano a la floración, ya que las plantas detienen su crecimiento vegetativo y comienzan a desarrollar sus órganos reproductivos. Durante el período de desarrollo de las plantas, el valor de K_c se tiende a mantener, para finalmente disminuir durante el período de maduración y senescencia, debido a la caída de hojas y menor fracción de cobertura del follaje en el suelo. Sin embargo, para los frutales de hoja persistente (siempre verdes) como es el caso de la murtilla en el sur, los valores de K_c tienden a ser relativamente constantes durante el período de crecimiento y desarrollo del cultivo.

Lo recomendable es utilizar valores de K_c calibrados y validados localmente y para cada estado fenológico del cultivo, hortaliza, pradera o huerto frutal. Sin embargo, cuando no se tiene disponible esta información, se pueden utilizar valores K_c referenciales de literatura como los publicados por Allen et al., 1998 (FAO56). Algunos valores de

coeficiente de cultivo (Kc) para ciertos cultivos hortícolas, praderas y cereales se muestran en el Cuadro 23, mientras que los valores de Kc para árboles frutales, generalmente se expresan en meses como se muestran en el Cuadro 24.

Cuadro 23. Algunos valores referenciales del coeficiente de cultivo (Kc) para distintos cultivos hortícolas, cereales, de tubérculo, praderas y bulbosas.

Cultivo	Fase del cultivo		
	Inicial	Media	Maduración
Arveja	0,50	1,15	1,10
Cebolla (guarda)	0,70	1,05	0,95
Ajo	0,70	1,00	0,70
Espárrago	0,30	0,95	0,30
Lechuga, espinaca	0,70	1,00	0,95
Brócoli, repollo y coliflor	0,70	1,05	0,95
Rábano	0,70	0,90	0,85
Maíz	0,30	1,15	0,40
Melón	0,50	0,85	0,60
Papa	0,50	1,15	0,75
Pimentón	0,70	1,05	0,85
Poroto verde	0,50	1,05	0,90
Lentejas	0,40	1,10	0,30
Sandía	0,40	1,00	0,75
Tomate	0,70	1,05	0,80
Zanahoria	0,70	1,05	0,95
Zapallo	0,50	1,00	0,80
Maravilla	0,35	1,15	0,35
Remolacha	0,50	1,05	0,95
Avena	0,30	1,15	0,25
Cebada	0,30	1,15	0,25
Trigo	0,35	1,15	0,45
Alfalfa			
Períodos individuales de corte	0,40	1,20	1,15
Promedio de los cortes	0,40	0,95	0,90
Trébol			
Períodos individuales de corte	0,40	1,15	1,10
Promedio de los cortes	0,40	0,90	0,85
Pastos de Pastoreo			
Pastos de rotación	0,40	0,85-1,05	0,85
Pastoreo extensivo	0,30	0,75	0,75
Pastos (Césped)			
Época fría	0,90	0,95	0,95
Época caliente	0,80	0,85	0,85

Fuente: Elaboración propia con datos de Allen et al. (1998) y Water Conservation Factsheet British Columbia, Ministry of Agriculture, Food and Fisheries (2001).

Cuadro 24. Algunos valores referenciales del coeficiente de cultivo (Kc) para distintas especies frutales.

	Fase del frutal		
	Inicio	medio	final
Arándanos	0,40	1,00	0,75
Frambueso	0,40	1,20	0,75
Frutillas	0,40	1,05	0,70
Zarzaparrilla	0,40	0,90	0,50
Cítricos (sin cobertura de suelo)			
- 70% cubierta vegetativa	0,70	0,65	0,70
- 50% cubierta vegetativa	0,65	0,60	0,65
- 20% cubierta vegetativa	0,50	0,45	0,55
Cítricos (con cobertura de suelo o malezas)			
- 70% cubierta vegetativa	0,75	0,70	0,70
- 50% cubierta vegetativa	0,80	0,80	0,80
- 20% cubierta vegetativa	0,85	0,85	0,85
Olivo (40-60% cobertura dosel)	0,65	0,70	0,70
Manzano, Peras, Cerezas			
- Sin cobertura suelo (fuertes heladas)	0,45	0,95	0,70
- Sin cobertura suelo (sin heladas)	0,60	0,95	0,75
- Cobertura activa de suelo (fuertes heladas)	0,50	1,20	0,95
- Cobertura activa de suelo (sin heladas)	0,80	1,20	0,85
Almendro (sin cobertura de suelo)	0,40	0,90	0,65
Uva de mesa o secas (pasas)	0,30	0,85	0,45
Vid vinífera	0,30	0,70	0,45

Fuente: Elaboración propia con datos de Allen et al. (1998) y Water Conservation Factsheet British Columbia, Ministry of Agriculture, Food and Fisheries (2001).

4.2.2.1.5. Evapotranspiración del cultivo, real o actual (ETc o ETa).

La ETc corresponde a la cantidad de agua real consumida por un cultivo o huerto frutal, y no al pasto verde en condiciones de referencia. Así, la ETc se define como la suma de la transpiración que realiza el cultivo y la evaporación de agua producida desde la superficie del suelo a la atmósfera. La ETc depende de factores asociados al clima, suelo, planta y manejo agronómico.

Al respecto, la ETc se puede expresar como:

$$ETc = ETo * Kc$$

Donde:

ETc = Evapotranspiración de cultivo o real (mm/día)

ETo = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Kc = Coeficiente de cultivo (adimensional)

En resumen, la ETc no es más que la multiplicación de la evapotranspiración de referencia (ETo) y el coeficiente de cultivo (Kc). Para llegar a esta simple expresión fue necesario entender cada uno de estos componentes por separado, como se vio en los capítulos anteriores. Los dos parámetros analizados engloban gran cantidad de conceptos que ayudan a comprender la dinámica y los factores que determinan los requerimientos de agua de los cultivos, praderas, hortalizas y frutales.

4.2.2.1.6. Precipitación efectiva (Pef)

Las precipitaciones o lluvias que caen en un período de tiempo determinado quedan almacenadas en el suelo, pero sólo una fracción de éstas se encuentra disponible para las plantas, lo que comúnmente se denomina “*precipitación efectiva*” (Pef). La Pef es muy importante en la programación del riego (frecuencia y tiempo de riego), ya que es considerada un aporte de agua a las plantas, que debe descontarse del aporte hecho por el agua de riego. De esta manera, es posible optimizar el uso del agua de riego, debido a que puede regarse con menos frecuencia y tiempo. Sin embargo, las lluvias de baja magnitud, casi siempre, no son consideradas como aportes de agua a la zona de raíces, ya que se pierden de manera rápida por evaporación.

La Pef a escala diaria se puede estimar según la siguiente expresión (Acevedo-Opazo et al., 2010):

$$Pef = (P - 10) * 0,75$$

Donde:

P = Precipitación bruta o real (mm)

La Pef a escala mensual se puede estimar según las siguientes expresiones:

a) Cuando la precipitación (P) es superior a 75 mm:

$$P_{ef} = (P - 25) * 0,8$$

b) Cuando la precipitación (P) es inferior a 75 mm:

$$P_{ef} = (P - 10) * 0,6$$

4.2.2.1.7. Períodos críticos de un cultivo

Los períodos críticos de los cultivos o frutales corresponden a aquellas etapas fenológicas donde el agua y nutrientes no deben faltar. Si estos dos elementos no se encuentran disponibles, los cultivos o frutales pueden sufrir daños irreparables, y con ello, afectar los objetivos de producción final (Cuadro 25 y 26). Por lo general, las etapas fenológicas claves de los cultivos o frutales ocurren en los períodos de máxima demanda atmosférica. Es necesario entonces abastecerlos siempre de agua y nutrientes durante dichos períodos.

Cuadro 25. Períodos sensibles o críticos a la falta de agua para algunas hortalizas, cereales y leguminosas.

Cultivo	Período Crítico
Arveja	Comienzo de floración y durante hinchamiento de la vaina
Cebolla	Durante la formación del bulbo
Ajo	Durante la formación del bulbo
Coliflor	Requiere riegos frecuentes desde siembra a cosecha, especialmente durante el desarrollo del pan
Espárrago	Comienzo de emisión de follaje
Lechuga	Requiere riego durante todo su período vegetativo, en especial durante formación de la cabeza
Maíz	Floración y grano lechoso
Papa	Desde floración a cosecha, especialmente a inicios de la formación del tubérculo
Pepino	Desde floración a cosecha
Pimentón y Ají	Desde floración a cosecha
Poroto	Floración, formación de la vaina y vaina verde
Repollo	Requiere riego durante todo su período vegetativo, en especial durante formación de la cabeza
Tomate	Floración a crecimiento rápido de los frutos
Zanahoria	Alargamiento de la raíz
Zapallo	Desarrollo del brote y floración
Maravilla	Desde formación de flor a madurez de semilla
Remolacha	Después de la siembra hasta completar la germinación de la semilla
Quinoa	Durante germinación-emergencia y crecimiento-llenado de la semilla
Avena	Espigadura
Cebada	Espigadura, floración y grano lechoso
Arroz	Espigadura y floración
Trigo	Espigadura, floración y grano lechoso

Fuente: Elaboración propia con datos de Jara y Valenzuela, 1998.

Cuadro 26. Períodos sensibles o críticos a la falta de agua para diferentes frutales.

Especie frutal	Período Crítico
Cítricos	Floración a cuaja; fase de crecimiento rápido del fruto
Olivo	Previo a floración hasta crecimiento final del fruto
Arándanos	Previo caída de pétalos, cuaja y crecimiento de las bayas
Frambueso	Previo a floración hasta crecimiento final del fruto
Frutilla	Desarrollo del fruto a madurez
Avellano europeo	Crecimiento y desarrollo del fruto
Manzano y peral	Cuaja a poco antes de cosecha
Cerezo	Crecimiento rápido del fruto a poco antes de cosecha
Nogal y almendro	Crecimiento del fruto y desarrollo de la semilla
Vid	Brotación a floración (cuaja); cuaja a crecimiento del fruto
Kiwi	Cuaja hasta antes de maduración

Fuente: Elaboración propia y adaptado de Ferreyra y Sellés, 1997.

Cualquier déficit o exceso de agua y nutrientes en los cultivos y frutales, produce una disminución del objetivo de producción (rendimiento, materia seca, entre otros). Sin embargo, existen ciertas etapas en el crecimiento y desarrollo de un cultivo o frutal, en que un estrés o exceso de agua puede provocar un mayor efecto negativo en la planta y en la producción. Estos estados corresponden a fases de activo crecimiento y división de las células que ocurren en muy poco tiempo, pero generan grandes cambios en algún componente productivo de la planta.

Tanto a los cultivos como a los frutales, el déficit y exceso de agua no les afectan de la misma forma, ni tampoco para un mismo cultivo o frutal en alguna de los diferentes períodos de crecimiento y desarrollo. Principalmente, los períodos más sensibles de los cultivos y frutales, son la floración y crecimiento de los frutos, tubérculos, bulbos, otros. Con esta información es posible enfrentar períodos donde falta el agua o hay escasez hídrica, ya que se puede regar menos en ciertas etapas fenológicas de los cultivos y frutales y ahorrar agua para los períodos en la cual si es imprescindible regar.

4.3. Programación del riego (PR).

La programación del riego es una metodología o procedimiento que permite determinar el nivel óptimo de riego a aplicar durante todo el crecimiento y desarrollo de los cultivos y frutales. Lo anterior, con el objetivo de optimizar y ser eficaces en el uso del agua para maximizar la producción y calidad de los productos agrícolas. Así, para cuantificar de manera más precisa los requerimientos hídricos, se necesita saber los conceptos básicos y obtener información específica del suelo, la planta, el clima y el método de

riego como fue expuesto en los capítulos anteriores de este boletín. Una vez que se interacciona la información, se puede definir la cantidad de agua a aplicar y en qué momento aplicarla durante el período de crecimiento y desarrollo (etapas fenológicas) de los cultivos y frutales (Figura 31). Esto permite optimizar el recurso hídrico y mejorar la calidad y productividad del producto final, lo que conlleva a mejorar la competitividad de los diferentes sectores agrícolas.

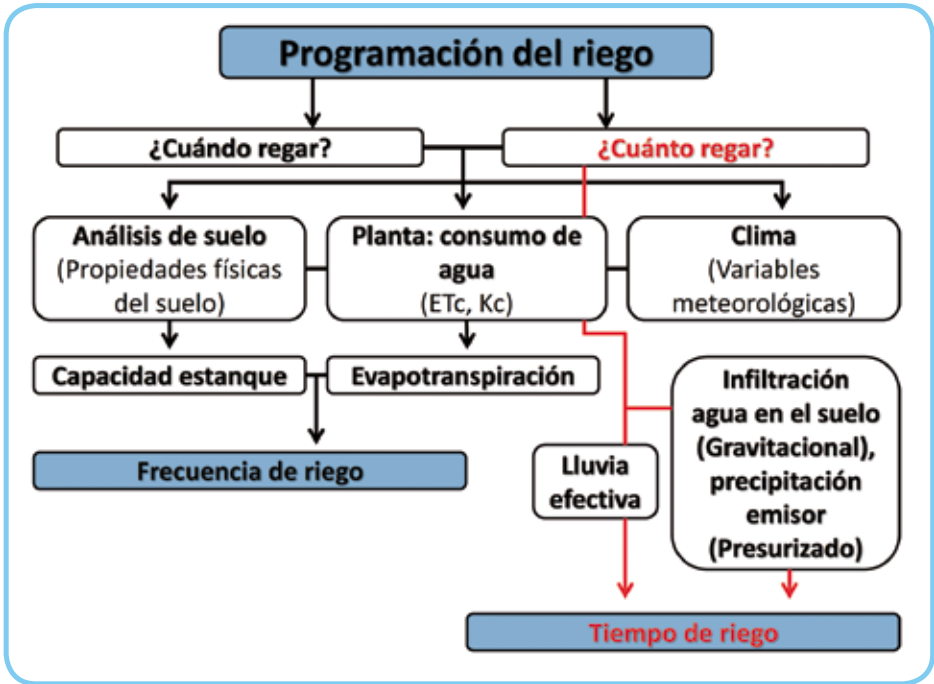


Figura 31. Diagrama de flujo conceptual de una adecuada programación del riego (López-Olivari, R. 2015).

4.3.1. Interrogantes básicas en la práctica del riego

¿Por qué regar?.

En la mayoría de los casos, cuando un agricultor debe regar, no tiene muy claro por qué lo hace. Lo cierto es que el agua de riego o de lluvia efectiva tiene un rol importante en algunos procesos de la fisiología y nutrición de las plantas, maximizando la producción y calidad de los productos agrícolas. A continuación se presentan algunos de ellos:

a) Transporte de nutrientes esenciales: las plantas en su interior contienen pequeños tubos (similar a las venas en el ser humano) donde el agua fluye con los nutrientes (principalmente Nitrógeno, Potasio, Calcio y Manganeso), trasportándolos desde las

raíces a los tallos y luego a las hojas, flores y frutos. Este proceso tiene un efecto concreto en el crecimiento y desarrollo de los diferentes órganos de la planta.

b) Efecto refrigerante: el paso del agua desde las raíces hacia la atmósfera tiene un efecto enfriador. Este efecto refrigerante se atribuye a la transpiración, ya que el agua presenta un alto calor de vaporización (2,45 MJ/kg), es decir, al pasar el agua desde el estado líquido al gaseoso, se libera esta cantidad de energía provocando el enfriamiento de las hojas.

c) Fotosíntesis y transpiración: un porcentaje pequeño del agua que pasa por la planta se queda en ella, mientras que el agua sobrante se pierde por transpiración a través de los estomas como vapor de agua, permitiendo a la vez el ingreso de la molécula de CO_2 . Este proceso es el costo que debe pagar el cultivo para producir hojas, tallos, frutos y raíces (fotosíntesis).

¿Cómo regar?.

El método o sistema de riego a utilizar se puede elegir en función de las consideraciones prácticas y técnicas, según sea el caso, expuestas en el Capítulo 3, donde se incluyen el sistema gravitacional (riego por surco) y sistema presurizado (aspersión, goteo y microaspersión). Los dos últimos son más eficientes en su aplicación, pudiendo realizar a través de ellos la fertirrigación (aplicación de fertilizantes en el riego).

¿Cuándo regar?.

Se refiere al momento que debe aplicarse el agua de riego, es decir, cada cuántos días regar (frecuencia de riego). Para determinar el momento del riego hay que considerar el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo (agua disponible total por las plantas). Lo anterior, depende de variables climáticas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación), de cultivo (períodos fenológicos), de suelo (textura y propiedades físico-hídricas del suelo) y del manejo agronómico (densidad de plantación o siembra, preparación de suelo, entre otros).

¿Cuánto regar?.

Se refiere al tiempo (horas) que el agua de riego debe estar pasando por los surcos (sistema gravitacional), goteando (riego por goteo) o asperjando (riego por aspersión o microaspersión) para reponer los consumos hídricos de los cultivos. Esto depende de la ET_c , precipitación del equipo de riego, velocidad de infiltración (VI) y conductividad hidráulica del suelo. Además, el tiempo de riego depende de la magnitud de las precipitaciones que caen durante el período de crecimiento y desarrollo de la planta, ya que parte de éstas suplen las necesidades de agua del cultivo (lluvias efectivas). Lo anterior, es una variable importante a considerar en zonas lluviosas, como es el caso del sur de Chile.

4.3.2. Frecuencia (Fr) y tiempo (Tr) de riego

La **frecuencia de riego** (¿Cuándo regar?): permite determinar el número de días que transcurren entre un riego y otro. Así, la frecuencia de riego se puede estimar de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{AFA}{ETc_{max}}$$

Donde :

Fr = Frecuencia de riego (días)

AFA = Agua fácilmente aprovechable o lámina neta (mm)

ETc_{max} = Evapotranspiración del cultivo del mes de máxima demanda (mm/día)

En los métodos de riego gravitacionales (tendido, surcos, bordes) y de aspersión, el suelo actúa como un estanque que almacena el agua aplicada en cada riego. La capacidad que tiene este estanque de almacenar agua, determina cuántos días pueden transcurrir entre un riego y otro.

En riegos de alta frecuencia, como el caso del método por goteo y microaspersión, el suelo no necesariamente actúa como un estanque almacenador de agua, debido a que es aplicado frecuentemente para mantener el contenido de humedad en el suelo cercana a capacidad de campo. Algunos años atrás, en los sistemas de alta frecuencia, la aplicación de agua de riego con una frecuencia diaria se realizaba para cualquier tipo de clase textural de suelo. Sin embargo, en la actualidad, los riegos con una frecuencia diaria son más apropiados para suelos con texturas medias a gruesas (franco arenoso o arenoso), con alto contenido de macro poros (alta macroporosidad). Mientras que los suelos más pesados o gredosos (Franco arcilloso o arcillosos), poseen una mayor capacidad de retención de humedad por tener una baja macroporosidad, por lo que riegos de baja frecuencia (cada 2 ó 3 días) pueden ser aplicados. Por otro lado, la frecuencia de riego puede ser mantenida de una manera fija o variable en el tiempo, ya que en general esta decisión, dependerá de la disponibilidad de agua del predio o el turno de agua que tenga el lugar que se desea regar.

El **Tiempo de riego** (¿Cuánto regar?): es el período de tiempo que debe permanecer el agua pasando por un surco de riego, goteando o asperjando sobre el suelo para que penetre hasta la profundidad efectiva de raíces del cultivo o frutal. También se puede definir como el número de horas (o minutos) en que el agua debe escurrir sobre el suelo para que pueda infiltrar y mojar la zona radicular del cultivo o frutal. Para las zonas en donde existe aporte de lluvias en los períodos de crecimiento y desarrollo de los cultivos, hortalizas, praderas y frutales deben ser consideradas en magnitud, ya que un

porcentaje de los requerimientos de agua pueden ser suplidos por estas lluvias.

Los tiempos de riego (T_r) pueden ser determinados utilizando varias expresiones o ecuaciones, dependiendo del tipo de método de riego que se va a utilizar.

a) Para un sistema de *riego gravitacional*:

El tiempo de riego en los sistemas de riego gravitacionales (surco, tendido, bordes) se determina de manera más precisa por medio de pruebas de infiltrometría y depende, principalmente, de la velocidad de infiltración (VI) que tenga el agua en el suelo (velocidad de infiltración estabilizada o básica). Para realizar estas pruebas de infiltración en terreno, se debe usar la metodología del surco infiltrómetro o cilindro infiltrómetro (vea ítem **4.2.1.2.1.**). Con la información recopilada de esta prueba, se puede obtener la ecuación general que representa con qué velocidad el agua se infiltra en el suelo. Una vez obtenidas las pruebas de velocidad de infiltración e infiltración acumulada en el tiempo, es posible determinar el agua fácilmente aprovechable (AFA) o lámina neta (L_n) por las plantas desde el suelo.

En el Cuadro 27 se presentan algunos valores referencial del tiempo de riego, según serie de suelo y profundidad de suelo, para un sistema de riego superficial (principalmente surco).

Cuadro 27. Valores “referenciales” del tiempo de riego (horas) en algunas series de suelo de la zona sur de Chile y según profundidad de suelo para un sistema de riego gravitacional.

	PROFUNDIDAD DE SUELO (cm)								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SERIES DE SUELO:									
Mininco	0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	2,9	3,6	4,4
Tijeral	1,2	2,1	3,1	4,3	5,6	7,0	8,5	10,0	11,7
Victoria	1,1	1,8	2,5	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,3
Santa Bárbara	1,8	3,1	4,4	5,9	7,5	9,2	11,0	12,8	14,7
Temuco	1,0	2,0	3,5	5,2	7,3	9,7	12,4	15,4	18,7
Vilcún	1,5	2,4	3,5	4,6	5,7	6,9	8,1	9,4	10,7
Nueva Imperial	0,1	0,2	2,2	2,9	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3
Barros Arana	1,2	2,0	3,0	4,2	5,4	6,7	8,1	9,5	11,0
Perquenco	0,4	0,6	0,9	1,2	1,5	1,9	2,2	2,5	2,9
Pemehue	0,3	0,5	0,8	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	3,6
Freire	0,5	0,8	1,1	1,5	1,8	2,1	2,5	2,8	3,2
Agua Fría	0,4	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1
Pelchuquín	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2
Correltúe	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Malihue	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5
Itropulli	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2
Ñadi Huiti	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6
Piedras negras	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7
Los Lagos	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Crucero	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4	2,7
Chan-Chan	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,1
Lanco	1,2	1,8	2,3	2,9	3,5	4,1	4,7	5,2	5,9
Valdivia	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,6	4,1	4,6	5,1

Fuente: Elaboración propia. Los valores de tiempo de riego deben ser verificados en campo en conjunto con el largo de los surcos.

El tiempo de riego final, que se obtiene, debe considerar el tiempo que se demora el agua en infiltrar de manera vertical y de manera horizontal (observando en el centro del camellón si se mojó hasta profundidad efectiva de raíces usando un barreno o pala). Además, hay que sumar a ello el tiempo que se demora el agua en llegar al final del surco. De esta manera se obtiene el tiempo de riego total que se debe dejar el agua escurrir por los surcos de riego.

b) Para sistema de *riego presurizado de alta frecuencia* (goteo, cinta o microaspersión):

En sistemas de riego por goteo o microaspersión, el tiempo de riego se puede calcular por medio de un balance entre los requerimientos hídricos que necesitan los cultivos o frutales y la capacidad que tiene el sistema de riego para entregar dicha agua. En este contexto, el tiempo de riego en horas por día por planta (riego diario), para un sistema de *riego por goteo o microaspersión*, se puede calcular de la siguiente forma:

$$N.R.D. = \frac{(ET_c - P_{ef}) * AU}{Ea}$$

$$Q_{pl} = qa * Ne * CU$$

$$Tr = \frac{N.R.D.}{Q_{pl}} = \frac{(ET_c - P_{ef}) * AU}{Ea * qa * Ne * CU}$$

Donde :

$N.R.D.$ = Necesidades brutas de riego diario (l/planta/día)

Q_{pl} = Caudal de agua aplicado por planta (l/h)

ET_c = Evapotranspiración del cultivo o real (mm/día)

P_{ef} = Precipitación efectiva (mm/día)

AU = Área unitaria del cultivo o marco de plantación (m²)

CU = Coeficiente de uniformidad (%/100)

Tr = Tiempo de riego (h/día)

Ne = Número de emisores por planta

Ea = Eficiencia de aplicación (se asume 0,90 para goteo y 0,85 para microaspersión)

qa = Caudal del emisor (l/h)

El tiempo de riego, tanto para sistemas por goteo o microaspersión, se pueden calcular como horas de riego por día. Sin embargo, en el caso que la frecuencia de riego no sea diaria (por ejemplo cada 2 o 3 días) por depender del AFA, como se vio más arriba, el tiempo de riego total se puede obtener multiplicando el tiempo de riego diario (h/día) por la frecuencia de riego (días).

c) Para sistema de riego presurizado de baja frecuencia (aspersión):

El tiempo de riego en un sistema de riego por aspersión se puede calcular utilizando las siguientes expresiones:

$$TR = \frac{Lb}{lpp}$$

$$Lb = \frac{AFA}{Ea}$$

$$lpp = \frac{qa}{DEL * DEA}$$

Donde:

- TR = Tiempo de riego (h)
- Lb = Lámina de reposición bruta (mm)
- lpp = Precipitación horaria de la instalación (mm/h)
- AFA = Agua fácilmente aprovechable o lámina neta (mm)
- Ea = Eficiencia de aplicación (se asume 0,75)
- qa = Caudal del aspersor (l/h)
- DEL = Distancia entre laterales (m)
- DEA = Distancia entre aspersores (m)

Para mayor detalle respecto a cómo determinar los caudales de los aspersores en una superficie determinada revisar el punto 3.3.2.1.

4.3.3. Programación de riego en un sistema por surco

Desarrollar un programa de riego en un cultivo de papa regado bajo un sistema de riego por surco mejorado cerca de localidad de Vilcún. Para ello se tiene la siguiente información (sólo mes de diciembre):

a) Información de Suelo:

Para simplificar el ejemplo, se usará un valor de ADT igual a 137,0 mm/m.

Además, los coeficientes de infiltración c y b referenciales para la serie de suelo Temuco son:

c	b
1,680	0,542

b) Información de cultivo:

Los coeficientes de cultivo (K_c) para el cultivo de papa pueden ser sacados de referencia en la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos FAO56 (Allen et al., 1998):

Estado	K_c
Inicial	0,45
Desarrollo	0,75
Medio	1,15
Maduración	0,85

La profundidad efectiva de raíces (P_{ef}) en el cultivo de papa es aproximadamente de 300 mm (30 cm). La evapotranspiración del cultivo (ET_c) máxima en el mes de diciembre es de 5,0 mm día⁻¹ ($ET_c = ET_o * K_c$). Mientras que el umbral o criterio de riego es de 35% (Allen et al., 1998)

c) Información de clima:

La información de ET_o se puede obtener directamente de las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de INIA a lo largo de todo Chile (<http://agromet.inia.cl/>).

Cálculo del Tiempo de Riego:

$$ADT_{P_{ef} = 30 \text{ cm}} = \frac{137,0 \text{ mm}}{1 \text{ m}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 300 \text{ mm} = 41,1 \text{ mm}$$

$$AFA = ADT * \frac{UR}{100} = 41,1 \text{ mm} * \frac{35}{100} = 14,39 \text{ mm} = 1,439 \text{ cm}$$

$$T_r = \left(\frac{14,39}{1,680} \right)^{\frac{1}{0,542}} = 52,03 \text{ min} = 0,87 \text{ horas}$$

A este tiempo de riego hay que agregar el adicional que se demora el agua en llegar al final del surco y el tiempo que se demora en infiltrar de manera horizontal. Lo ideal y aconsejable es que estos cálculos teóricos, sacados por tabla, se verifiquen en campo.

Cálculo de la Frecuencia de Riego:

En este caso, como se muestra en la planilla abajo de programación de riego, se debe regar, en este ejemplo, cuando la ETc acumulada sea igual o menor a un AFA de 14,39 mm, ya que es el agua que las plantas pueden absorber fácilmente desde el suelo. Además, las lluvias efectivas fueron descontadas del aporte del agua de riego.

Planilla de programación de riego para el cultivo de papa

Fecha	ETo (mm/día)	Kc	ETc (mm/día)	Precipitación (mm)	Precipitación efectiva (mm)	ETc acumulado (mm)	Riego
1-Dic-15	3,3	1,15	3,74	0	0	3,74	Riego
2-Dic-15	4,1	1,15	4,73	0,1	0	8,47	
3-Dic-15	2,9	1,15	3,28	0	0	11,75	
4-Dic-15	3,5	1,15	3,99	0	0	3,99	Riego
5-Dic-15	3,9	1,15	4,54	0	0	8,53	
6-Dic-15	3,2	1,15	3,65	0	0	12,18	
7-Dic-15	3,8	1,15	4,34	0	0	4,34	Riego
8-Dic-15	3,6	1,15	4,10	0	0	8,44	
9-Dic-15	3,5	1,15	3,98	0	0	12,42	
10-Dic-15	3,8	1,15	4,33	0	0	4,33	Riego
11-Dic-15	3,1	1,15	3,58	0	0	7,91	
12-Dic-15	2,6	1,15	3,03	0	0	10,94	
13-Dic-15	1,2	1,15	1,43	30,7	15,525	-3,16	Aporte Pp
14-Dic-15	3,8	1,15	4,37	1,1	0	1,22	
15-Dic-15	3,7	1,15	4,27	0	0	5,49	
16-Dic-15	2,8	1,15	3,17	0	0	8,65	
17-Dic-15	3,8	1,15	4,37	0	0	13,02	
18-Dic-15	3,7	1,15	4,28	0	0	4,28	Riego
19-Dic-15	3,5	1,15	4,08	0	0	8,36	
20-Dic-15	3,2	1,15	3,69	0	0	12,05	
21-Dic-15	2,0	1,15	2,27	3,2	0	14,32	
22-Dic-15	3,3	1,15	3,83	1,4	0	3,83	Riego
23-Dic-15	3,6	1,15	4,09	3,7	0	7,92	
24-Dic-15	3,9	1,15	4,48	0	0	12,4	
25-Dic-15	3,8	1,15	4,35	0	0	4,35	Riego
26-Dic-15	3,9	1,15	4,45	0	0	8,80	
27-Dic-15	4,1	1,15	4,67	0	0	13,47	
28-Dic-15	3,4	1,15	3,97	0	0	3,97	Riego
29-Dic-15	4,2	1,15	4,82	0	0	8,79	
30-Dic-15	4,4	1,15	5,09	0	0	13,88	
31-Dic-15	4,2	1,15	4,78	0	0	4,78	Riego

4.3.4. Programación de riego en un sistema de riego por goteo

Desarrollar un programa de riego en un cultivo de Arándano de 3 años regado bajo un sistema de riego por goteo. Para ello se tiene la siguiente información (sólo mes de enero):

a) Información de Suelo:

Estrata	Prof. raíces Efectiva (mm)	% de Piedras	Textura	CC (%vol)	PMP (%vol)	Criterio o Umbral de riego (%)	HA (%vol)	AFA (mm)
I	350	0	Franco limoso	42,48	24,87	40	17,61	24,65
							TOTAL (mm)	24,65

b) Información de Cultivo y Sistema de riego:

Cultivo	Arándano
Variedad	Brigitta
Cuartel	Potrero Alto
Distancia entre hileras (m)	3
Distancia sobre hileras (m)	0,9
Caudal gotero (l h⁻¹)	2
Líneas de gotero	2
Número goteros por línea y planta	2
Eficiencia del riego por goteo (fracción)	0,9
Coefficiente de uniformidad (fracción)	0,9
Kc (adimensional)	1,0^(*)
Profundidad efectiva de raíces (cm)	35
Precipitación del equipo (mm h⁻¹)	2,4

(^{*}): El valor de Kc puede ser sacado de referencia en la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos FAO56 (Allen et al., 1998).

c) Información de Clima

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se determina multiplicando ETo por el Kc del cultivo. La ETo se puede obtener de las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de INIA a lo largo de todo Chile (<http://agromet.inia.cl/>).

Cálculo del Tiempo de riego

Para este caso, la planilla contiene los cálculos del tiempo de riego diario (h/día) y el tiempo de riego a reponer para una ETc acumulada igual o menor al agua fácilmente aprovechable por las plantas (AFA). Así, el tiempo de riego para una frecuencia de riego diario está dado por (ejemplo planilla programación de riego arándano más abajo para el día 2-Ene-16).

$$N.R.D. = (ETc - P_{ef}) * AU = (5,1 - 0) * 2,7 = 13,77 \text{ Lpl}^{-1} \text{ día}^{-1}$$

$$TR = \frac{N.R.D.}{Ne * Ea * qa * CU} = \frac{13,77}{6,48} = 2,12 \text{ h}$$

Por otro lado, el tiempo de riego puede ser aplicado para una ETc acumulada como:

$$N.R.D. = (ETc - P_{ef}) * AU = (22,3 - 0) * 2,7 = 60,21 \text{ L/planta /día}$$

$$TR = \frac{N.R.D.}{Ne * Ea * qa * CU} = \frac{60,21}{6,48} = 9,2 \text{ h}$$

Cálculo de la Frecuencia de riego

En este caso, AFA es 24,65 mm, por lo que hay que regar nuevamente antes que se agote esa cantidad de agua aprovechable por las plantas en el suelo. Así, el primer riego siguiendo la planilla de programación de riego abajo, sería reponer 22,3 mm que se evapotranspiraron, por lo que el Tr para reponer esa cantidad de agua sería de 9,2 h (día 6-Ene-16). De esta manera, la *frecuencia de riego* va a estar en función de la cantidad de agua que se va agotando desde el perfil del suelo (AFA), que en este caso del ejemplo, va a llegar sólo al 40% (criterio o umbral de riego) del agua disponible total (ADT) para volver a regar.

Planilla referencial de programación de riego, utilizando datos diarios, en el cultivo de Arándano

Fecha	ETo (mm/día)	Kc	ETc (mm/día)	Pp (mm)	Pef (mm)	ETc acumulado (mm)	Riego y/o Aporte Precipitaciones	Tiempo Riego (h)	Tiempo Riego diario (h)
1-Ene-16	5,0	1,0	5,0	0,0	0,0	5,00			2,08
2-Ene-16	5,1	1,0	5,1	0,0	0,0	10,10			2,12
3-Ene-16	2,4	1,0	2,4	0,0	0,0	12,50			1,00
4-Ene-16	4,9	1,0	4,9	0,0	0,0	17,40			2,04
5-Ene-16	4,9	1,0	4,9	0,0	0,0	22,30			2,04
6-Ene-16	5,1	1,0	5,1	0,0	0,0	5,10	Riego	9,2	2,12
7-Ene-16	3,9	1,0	3,9	0,0	0,0	9,00			1,62
8-Ene-16	3,9	1,0	3,9	0,0	0,0	12,90			1,62
9-Ene-16	4,0	1,0	4,0	0,0	0,0	16,90			1,67
10-Ene-16	3,7	1,0	3,7	0,0	0,0	20,60			1,54
11-Ene-16	3,6	1,0	3,6	0,0	0,0	24,20			1,50
12-Ene-16	3,5	1,0	3,5	0,0	0,0	3,50	Riego	10,0	1,45
13-Ene-16	4,8	1,0	4,8	0,0	0,0	8,30			2,00
14-Ene-16	4,5	1,0	4,5	0,0	0,0	12,80			1,87
15-Ene-16	3,0	1,0	3,0	0,5	0,0	15,80			1,25
16-Ene-16	4,4	1,0	4,4	0,0	0,0	20,20			1,83
17-Ene-16	4,7	1,0	4,7	0,0	0,0	4,70	Riego	8,4	1,95
18-Ene-16	4,9	1,0	4,9	0,0	0,0	9,60			2,04
19-Ene-16	5,0	1,0	5,0	0,0	0,0	14,60			2,08
20-Ene-16	5,2	1,0	5,2	0,1	0,0	19,80			2,16
21-Ene-16	4,9	1,0	4,9	0,0	0,0	4,90	Riego	8,2	2,04
22-Ene-16	4,8	1,0	4,8	0,0	0,0	9,70			2,00
23-Ene-16	4,7	1,0	4,7	0,0	0,0	14,40			1,95
24-Ene-16	1,6	1,0	1,6	1,2	0,0	16,00			0,67
25-Ene-16	3,8	1,0	3,8	0,0	0,0	19,80			1,58
26-Ene-16	3,3	1,0	3,3	1,2	0,0	23,10			1,37
27-Ene-16	1,6	1,0	1,6	6,8	0,0	1,60	Riego	9,6	0,67
28-Ene-16	3,4	1,0	3,4	0,1	0,0	5,00			1,41
29-Ene-16	3,8	1,0	3,8	0,0	0,0	8,80			1,58
30-Ene-16	4,7	1,0	4,7	0,0	0,0	13,50			1,97
31-Ene-16	4,9	1,0	4,9	0,0	0,0	18,40			2,04

Nota: es importante recalcar que para los Tr diarios se debe considerar el valor de ETc del día anterior, es decir, si se desea regar el 2 de enero se debe considerar la ETc del día 1 de enero.

4.3.5. Programación de riego en un sistema por aspersión

Desarrollar un programa de riego en un cultivo de praderas (Trébol rosado) en pleno crecimiento vegetativo regado bajo un sistema de riego por aspersión (Cobertura total). Para ello se tiene la siguiente información:

a) Información de suelo.

Es- tra- ta	Prof. raíces Efectiva (mm)	Textura	CC (%vol)	PMP (%vol)	VI básica (mm/h)	Criterio o Umbral de riego (%)	HA (%vol)	AFA (mm)
I	300	Franco Arcilloso	53,79	29,59	6,5	50	24,2	36,3
							TOTAL (mm)	36,3

b) Información de cultivo y sistema de riego por aspersión con disposición en cuadrado:

Cultivo	Trébol rosado
Variedad	Quiñiqueli
Superficie total	6 hectáreas
Topografía del terreno	plano
Cuartel	Sector 1
Distancia entre laterales (m)	12
Distancia sobre aspersores (m)	12
Caudal emisor ($l\ s^{-1}$)	0,24
Eficiencia del riego por aspersión (fracción)	0,75
Kc (adimensional)	1,15 ^(*)
Profundidad efectiva de raíces (cm)	30
Precipitación del equipo (lpp; $mm\ h^{-1}$)	6,0

(*): El valor de Kc puede ser sacado de referencia en la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos FAO56 (Allen et al., 1998).

c) Información de clima.

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se determina multiplicando ETo por el Kc del cultivo. La ETo se puede obtener de las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de INIA a lo largo de todo Chile (<http://agromet.inia.cl/>). Mientras que la velocidad del

viento promedio durante el período de crecimiento y desarrollo del cultivo es de 3,5 m/s.

Cálculo del Tiempo y Frecuencia de riego

El tiempo de riego a reponer para una ETc acumulada igual o menor al agua fácilmente aprovechable por las plantas (AFA) está dada por la siguiente ecuación:

$$Lb = \frac{AFA}{Ea} = \frac{36,3}{0,75} = 48,4 \text{ mm}$$

$$Lpp = \frac{qa}{DEL * DEA} = \frac{0,24 * 3600}{12 * 12} = 6,0 \text{ mm/h}$$

En este ejemplo, lpp es inferior a la velocidad de infiltración básica mostrada en el cuadro a) de esta sección (< 6,5 mm/h). Si lo anterior no se cumple es necesario seleccionar otro modelo de aspersor con otro tipo de boquilla. Siguiendo este esquema el tiempo de riego sería:

$$Tr = \frac{Lb}{lpp} = \frac{48,4}{6} = 8,0 \text{ h}$$

Así, para reponer una lámina bruta de 48,4 mm se debe regar 8 h. De esta manera, la frecuencia de riego va a estar en función de la cantidad de agua que se va agotando desde el perfil del suelo (AFA), que en este caso del ejemplo, va a llegar sólo al 50% (criterio o umbral de riego sin provocar estrés hídrico en el trébol rosado, según metodología FAO56, Allen et al., 1998) del agua disponible total (ADT) para volver a regar.

Planilla referencial de programación de riego, utilizando datos diarios, en el cultivo de trébol rosado en pleno crecimiento vegetativo ($K_c = 1,15$)

Fecha	ET _o (mm/día)	K _c	ET _c (mm/día)	P _p (mm)	P _{ef} (mm)	ET _c acumu- lado (mm)	Riego y/o Aporte Precipita- ciones	Tiempo Riego (h)
21-Nov-15	2,5	1,15	2,84	1,1	0	11,96		
22-Nov-15	2,5	1,15	2,86	0	0	14,81		
23-Nov-15	3,2	1,15	3,70	0	0	18,51		
24-Nov-15	2,7	1,15	3,07	1,1	0	21,59		
25-Nov-15	2,8	1,15	3,23	1	0	24,81		
26-Nov-15	3,5	1,15	4,01	0	0	28,83		
27-Nov-15	2,6	1,15	2,95	0,4	0	31,77		
28-Nov-15	4,0	1,15	4,59	0	0	4,59	Riego	7,1
29-Nov-15	4,6	1,15	5,31	0	0	9,90		
30-Nov-15	3,6	1,15	4,18	0	0	14,08		
1-Dic-15	3,8	1,15	4,38	0	0	18,46		
2-Dic-15	4,7	1,15	5,42	0	0	23,88		
3-Dic-15	2,6	1,15	3,01	0	0	26,89		
4-Dic-15	4,3	1,15	4,93	0	0	31,82		
5-Dic-15	4,7	1,15	5,39	0	0	5,39	Riego	7,1
6-Dic-15	4,2	1,15	4,79	0	0	10,18		
7-Dic-15	3,3	1,15	3,75	0	0	13,94		
8-Dic-15	3,6	1,15	4,12	0	0	18,06		
9-Dic-15	3,7	1,15	4,28	0	0	22,34		
10-Dic-15	4,0	1,15	4,55	0	0	26,89		
11-Dic-15	3,7	1,15	4,26	0	0	31,15		
12-Dic-15	2,3	1,15	2,69	0	0	33,84		
13-Dic-15	1,1	1,15	1,29	35,5	19,87	15,26	Aporte Pp	
14-Dic-15	3,5	1,15	4,05	5,1	0	19,31		
15-Dic-15	4,0	1,15	4,63	0	0	23,94		
16-Dic-15	2,6	1,15	3,01	0	0	26,95		
17-Dic-15	3,2	1,15	3,62	0	0	30,57		
18-Dic-15	4,0	1,15	4,63	0	0	35,20		
19-Dic-15	4,3	1,15	4,93	0	0	4,93	Riego	7,8
20-Dic-15	2,4	1,15	2,78	0	0	7,70		
21-Dic-15	1,9	1,15	2,14	18,9	7,42	2,42	Aporte Pp	

La frecuencia de riego (Fr) se debe determinar en función de la ETc del mes de máxima demanda durante el período de crecimiento del cultivo (punto 4.3.2.). De esta manera, si se asume que diciembre es el mes de máxima demanda la ETc tendría un valor de 5,42 (en la planilla día 2-Dic-15). Entonces Fr se calcula como sigue:

$$Fr = \frac{AFA}{ETc} = \frac{36,3}{5,42} = 6,7 \approx 6,0 \text{ días}$$

Así, la Fr para todo el período de crecimiento y desarrollo del cultivo sería de 6,7 días (en este caso se aproxima a 6 días). Por otro lado, para el sistema de riego por aspersión, si se desea calcular la superficie mínima de riego diario (SMRD) se puede determinar de la siguiente manera:

$$SMRD = \frac{ST}{Fr} * 7/6 = \frac{6}{6} * 7/6 = 1,17 \text{ ha/día}$$

Donde:

SMRD = superficie mínima de riego diario (ha/día),

ST = superficie total a regar (ha),

Fr = frecuencia de riego en el mes de máxima demanda (días),

7/6 = factor de corrección que considera el riego sólo en 6 días de los 7 de la semana. Se considera entonces un día a la semana para la mantención de equipos

4.3.6. Selección y programación en un sistema de riego por carrete

Se desarrollará un ejemplo de selección y cálculo del riego usando el sistema por cañón.

Así, para desarrollar el ejemplo se utilizará un campo de 32 hectáreas, con dimensiones de 800 m de longitud y 400 m de ancho (Figura 32). Adicionalmente, se requiere incluir una tubería de aducción enterrada desde la fuente de agua hasta la última posición del carrete. El terreno es plano en sentido transversal. Sin embargo la fuente de agua está en una cota de 8 m más baja que el último hidrante.

a) Información de suelo

Estra- ta	Prof. raíces Efectiva (mm)	Textura	CC (%vol)	PMP (%vol)	VI básica (mm/h)	Criterio o Umbral de riego (%)	HA (%vol)	AFA (mm)
I	600	Franco limoso	46,95	36,66	20	55	10,3	33,9
							TOTAL (mm)	33,9

b) Información del cultivo y sistema de riego por cañón

Cultivo	Pradera
Profundidad efectiva de raíces (cm)	60
Tiempo de operación máxima, To (h)	20
Días que se trabajan a la semana (días)	6
Caudal disponible en el predio (l s ⁻¹)	40
Eficiencia del riego por cañón (fracción)	0,75
ETc máxima (mm día ⁻¹ o L m ⁻² día ⁻¹)	4,8

c) Información de clima

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se determina multiplicando ETo por el Kc del cultivo. La ETo se puede obtener de las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de INIA a lo largo de todo Chile (<http://agromet.inia.cl/>). Mientras que la velocidad del viento promedio durante el período de crecimiento y desarrollo del cultivo es de 4,5 m s⁻¹.

A partir de los antecedentes anteriores se puede calcular

AFA = 33,9 mm.

L_b = 45,2 mm.

F_r = 33,9 mm/4,5 mm día⁻¹ = 7,5 días (ajustando a F_r = 7 días, se tiene que AFA = 7*4,5 = 31,5 mm y L_b = 42 mm.)

SMRD = 5,33 has.

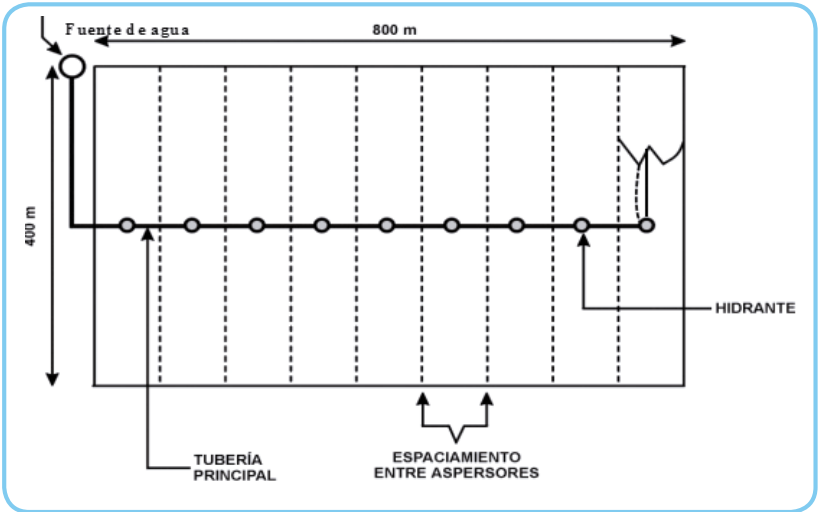


Figura 32: Esquema de referencia del predio a diseñar y regar

Así, el caudal total de bombeo necesario para estas condiciones está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_i = 2,77 * \left(\frac{ET_m}{Ef_a} \right) * \frac{1}{T_o} * \left(\frac{7}{6} \right) = 2,77 * \left(\frac{4,5}{0,75} \right) * \frac{1}{20} * \left(\frac{7}{6} \right) = 0,969 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$$

$$Q_t = Q_i * A = \frac{0,969 \text{ l s}^{-1}}{\text{ha}} * 32 \text{ ha} = 31,0 \text{ l s}^{-1}$$

Lo anterior quiere decir que se podrá regar el predio con un carrete que presente un cañón que aporte un caudal total de bombeo de 31,0 l s⁻¹. Así, el aspersor seleccionado de acuerdo con el Cuadro 28 (Capítulo 3) para un gasto de 31,0 l s⁻¹, tendría un diámetro de boquilla de 35,6 mm, un diámetro de mojado de 135 m, y una presión de operación de 50 m.c.a. (5,0 bares). Por su parte, la intensidad de precipitación media del cañón (IP_{cañón}, mm/h) será:

$$IP_{cañón} = \frac{Q_a}{0,785 * (D)^2} * 3.600 * \left(\frac{360}{\omega_c} \right)$$

Donde, Q_a es el caudal del cañón (l s⁻¹); D es diámetro de mojado (m) y ω_c es el sector del círculo que recibe el agua (grados). Así, el IP_{cañón} para un círculo de mojado hipotético de 220° (ω_c) sería:

$$IP_{cañón} = \frac{31,0}{0,785 * (135)^2} * 3.600 * \left(\frac{360}{220} \right) = 12,7 \text{ mm ha}^{-1}$$

Puede observarse que este cañón no tendría prácticamente problemas en el suelo franco limoso presente en el predio por estar bajo la velocidad de infiltración estabilizada de 20 mm h⁻¹.

Además, es probable que haya días con vientos fuertes que es el caso del ejemplo (4,5 m s⁻¹) por lo que se recomienda multiplicar el diámetro nominal de mojado del aspersor por un factor que aparece en el capítulo 3. De esta forma, si la velocidad del viento es de 4,5 m s⁻¹, el espaciamiento entre líneas de recorrido del cañón (E_r) sería de 81 m (135*0,6 = 81 m). Además, si el sentido de marcha del cañón en el campo tiene 800 m (ancho del potrero), el número de franjas a regar será de 9,8 (800 m/81 m). Si se dejan 9 franjas E_r sería de 800/9 = 88,9 m que corresponde a un 66% del diámetro de mojado sobrepasando lo recomendado. Así, se tomarán 10 bandas y el espaciamiento quedará E_r = 800/10 = 80 m, que corresponde a un 59% del diámetro de mojado.

Por otro lado, la velocidad de avance del cañón (V_c , m/h), considerando una lámina neta de 31,5 mm lo que daría una lámina bruta (L_b) de 42,0 mm (31,5 mm/0,75), el valor de V_c sería de:

$$V_c = \frac{Q_a}{E_r * L_b} * 3.600 * \frac{31,0}{80 * 42,0} * 3.600 = 33,2 \text{ m h}^{-1}$$

O sea, está dentro del intervalo de velocidades que puede desarrollar la máquina (entre 5 y 50 m h⁻¹) (Tarjuelo, 2005).

Por otro lado, el tiempo total (T_{tr}) necesario para regar una franja (tiempo de recorrido del cañón) depende del largo de la manguera (L_m) y la velocidad de avance del cañón (V_c), además del tiempo de funcionamiento sin avance al principio (T_i) y al final (T_f) de la misma, así como la conveniencia de realizar una o dos posturas al día. Para nuestro ejemplo será lo siguiente:

$$D_i = \frac{2}{3} * R = \frac{2}{3} * 67,5 \text{ m} = 45 \text{ m}$$

Donde, R es el radio de mojado del cañón (m)

$$T_i = \frac{2}{3} * \frac{\alpha}{360} * \frac{R}{V_c} = \frac{2}{3} * \frac{220}{360} * \frac{67,5 \text{ m}}{33,2 \text{ m h}^{-1}} = 0,99 \text{ h}$$

La longitud de la manguera entonces será de $L_m = (400 \text{ m}/2) - 45 \text{ m} = 155 \text{ m}$. Por lo que el T_{tr} empleado para regar una franja es de:

$$T_f = \frac{2}{3} * \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right) * \frac{R}{V_c} = \frac{2}{3} * \left(1 - \frac{220}{360}\right) * \frac{67,5 \text{ m}}{33,2 \text{ m h}^{-1}} = 0,53 \text{ h}$$

Lo anterior permite realizar 3 posturas al día según el tiempo previsto en este ejemplo (20 h día⁻¹).

$$T_{tr} = \frac{L_m}{V_c} + T_i + T_f = \frac{155 \text{ m}}{33,2 \text{ m h}^{-1}} + 0,99 \text{ h} + 0,53 \text{ h} = 6,2 \text{ h}$$

Finalmente, se adopta un enrollador con un cañón que descargue 111,6 m³ h⁻¹ (31 l s⁻¹) a 50 m.c.a. (5,0 bares) con boquilla de diámetro de 35,6 mm y con una manguera que se pueda extender hasta los 155 m, manejándolo a una velocidad de 33,2 m h⁻¹; con tiempos de funcionamiento sin movimiento al principio y al final de la franja regada de 59,4 minutos y 31,8 minutos, respectivamente. Lo anterior dará una dosis neta de 31,5 mm y una dosis bruta de 42 mm permitiendo satisfacer las necesidades hídricas del cultivo durante 7 días.

4.3.7. Selección y programación en un sistema de riego por pivote central

Se desarrollará un ejemplo de selección y cálculo del riego usando el sistema de pivote central. Aquí no se analizará cómo elegir y distribuir los emisores en la tubería del pivote.

La información general del predio es una parcela cuadrada de 51,78 ha (719,6 m x 719,56 m) ubicado en la comuna de Gorbea (serie Pemehue), Región de La Araucanía. Además, se tiene los siguientes antecedentes:

a) Información de suelo

Estrata	Prof. raíces Efectiva (mm)	Textura	CC (%vol)	PMP (%vol)	Criterio o Umbral de riego (%)	HA (%vol)	HA (mm)	AFA (mm)
I	300	Franco limoso	46,9	36,7	35	10,2	30,6	10,7
							TOTAL (mm)	10,7

b) Información del cultivo y sistema de riego por pivote central

Cultivo	Papa
Profundidad efectiva de raíces (cm)	30
Eficiencia del riego (fracción)	0,85
ETc máxima (mm día ⁻¹ o L m ⁻² día ⁻¹)	5,6
Tiempo de operación diaria (h día ⁻¹)	22
Velocidad máxima de avance última torre (m min ⁻¹)	2,0 ^(*)
Días de operación a la semana (días)	7

(*): Se puede obtener de los catálogos de los proveedores.

c) Información del equipo

- Se utilizarán torres de 50 m o 35 m y un alero.
- Largo del alero: múltiplo de 3 m con un máximo de 24 m.
- Aspersores que trabajan a una presión nominal de 2,1 bares (kg cm⁻²).
- Diámetro o ancho de mojamiento aspersor (AM) = 25 m en el extremo móvil.
- La velocidad de desplazamiento de la última torre es de 1,8 m min⁻¹.

d) Información de clima

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se determina multiplicando ETo por el Kc del cultivo. La ETo se puede obtener de las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de INIA a lo largo de todo Chile (<http://agromet.inia.cl/>). Mientras que la velocidad del viento promedio durante el período de crecimiento y desarrollo del cultivo es de 3,5 m s⁻¹.

El cálculo se puede estructurar de la siguiente forma, de acuerdo a los datos disponibles como:

1.- Largo del equipo, número de torres y largo del voladizo

- Superficie donde se emplazará la unidad pivote corresponde: S = 517.800 m².
- Diámetro del círculo a cubrir con riego: D = 719,6 m y radio (R) = D/2 = 359,8 m.
- Número de torres será: 359,8/50 = 7,2. Es decir se instalarán 7 torres de 50 m (350 m) y se agregará un voladizo de 6 m dejando 3,8 m a regar por el aspensor final.

A partir de esta información se define el área que será regada por la máquina:

$$A = \frac{\pi * (L_p + R)^2}{10.000} = \frac{3,1416 * (356 + 3,8)^2}{10.000} = 40,7 \text{ ha}$$

Donde:

- A = Área regada (ha)
L_p = Longitud total del pivote (m)
R = Alcance del cañón final (m)

En este ejemplo, como la superficie cuadrada del predio es de 51,78 hectáreas, quedarían sin regar 11,1 hectáreas, lo que representa el 21,46%.

2.- Capacidad máxima del equipo pivote

La capacidad o caudal del equipo debe calcularse para satisfacer los requerimientos diarios del cultivo en el mes de máxima demanda. En este ejemplo, para el cultivo de papa se consideran necesidades hídricas netas durante el mes de enero de 5,6 mm día⁻¹ o 173,6 mm (1736 m³ ha⁻¹). Así, el caudal máximo del equipo se puede determinar como sigue:

$$Q_o = \frac{ETc_{max} * A * 10}{Ea * t_o} = \frac{5,6 * 40,7 * 10}{0,85 * 22} = 121,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 33,86 \text{ l s}^{-1}$$

donde:

Q_0 : Caudal total del sistema ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$).

ETc_{max} : Necesidades netas del cultivo en el mes de máxima demanda (mm día^{-1} o $\text{l m}^{-2} \text{día}^{-1}$).

A : Área regada por el pivote (ha).

E_a : Eficiencia de riego (0,85)

t_0 : Número de horas de riego (u horas de operación al día) (h día^{-1})

Lo que significa una descarga de $33,86/40,7 = 0,83 \text{ l s}^{-1} \text{ha}^{-1}$.

Es necesario tener presente que la disponibilidad de agua en el predio debe ser suficiente para cubrir la demanda requerida, de lo contrario habría que disminuir el área regada.

3.- Tiempo mínimo de rotación y número de rotaciones por día

El tiempo necesario para que el lateral realice una rotación o revolución depende de la velocidad de desplazamiento de la última torre y de la longitud que debe recorrer. Así, el radio total del brazo completo del pivote (R_L), desde el punto pivote hasta la última torre (no se considera el largo del voladizo)

$$T_1 = \frac{2 * \pi * R_L}{V_{max} * 60} = \frac{2 * 3,1416 * 350}{2,0 * 60} = 18,32 \text{ h}$$

Donde:

T_1 : Tiempo mínimo de rotación o revolución (h).

R_L : radio del brazo del pivote, desde el centro hasta la última torre (distancia de la última torre al centro pivote sin considerar el voladizo) (mm día^{-1} o $\text{l m}^{-2} \text{día}^{-1}$).

V_{max} : Velocidad máxima de avance de la última torre (m min^{-1}).

Dado que el equipo debe satisfacer la ETc máxima, es necesario determinar el número de rotaciones que la máquina debe realizar cada día para satisfacer la demanda a la velocidad de avance definida:

$$N_r = \frac{T_0}{T_1} = \frac{22}{18,32} = 1,2$$

Donde:

N_r : Número de rotaciones por día

T_0 : Tiempo de operación diaria (h). Este tiempo no puede ser superior a 22 horas por día, para tener tiempo de reparación en caso que falle el equipo.

T_1 : Tiempo mínimo de rotación o revolución (h).

Así, el equipo debe rotar 1,2 veces en el día lo cual satisfac los 5,6 mm día⁻¹ de ETc máxima, como se demuestra a continuación:

Caudal del equipo 121,9 m³ h⁻¹.

Tiempo de rotación 18,32 h.

Caudal aplicado en una rotación (121,9 m³ h⁻¹*18,32 h) = 2233,2 m³.

Altura de agua aplicada (mm rotación⁻¹) = (2233,2 m³/(40,7 ha*10000 m²)*1000 = 5,49 mm rotación⁻¹.

Altura de agua aplicada en 1 rotación al día = (5,49*1,2) = 6,59 mm

Lámina neta, considerando eficiencia de 85% = (6,59*0,85) = 5,59 mm día⁻¹.

Además, el tiempo de rotación de la máquina puede aumentar disminuyendo la velocidad de avance de la última torre. Mientras más lento es el avance de la máquina, mayor es la lámina de riego que se aplica en cada vuelta. Sin embargo, la velocidad mínima de avance de la máquina debe ajustarse a las características de infiltración del suelo, de tal manera que no se produzca o se minimice el escurrimiento superficial. La intensidad de precipitación del último aspersor debe ser igual o menor a la velocidad de infiltración del suelo. Además, es necesario considerar la capacidad de almacenamiento superficial del suelo. Una aproximación a la intensidad de precipitación del aspersor ubicado en la última torre, puede calcularse de acuerdo a la siguiente expresión, considerando que el aspersor tiene un patrón de mojado elíptico:

$$lpp = \frac{ETc_{max}}{T_o * E_a} * \left(\frac{8 * R_L}{22 * 0,85} \right) = \frac{5,6}{22 * 0,85} * \left(\frac{8 * 350}{25} \right) = 33,54 \text{ mm h}^{-1}$$

Donde:

lpp : Intensidad de lluvia del último aspersor (mm h⁻¹).

AM : Ancho del patrón de mojado del último aspersor (m).

Dado que el pivote está avanzando constantemente, la infiltración se realiza en la parte alta de la curva de velocidad de infiltración. Por esto se requiere conocer las características de infiltración del suelo en este momento, que es muy superior a la velocidad de infiltración básica o estabilizada. Es necesario por lo tanto contar con información respecto a este parámetro, para determinar a los cuántos minutos de iniciado el riego de un punto, la intensidad de precipitación del último aspersor igual a la velocidad de infiltración del suelo. Así, se elige la curva característica de velocidad de infiltración de un suelo perteneciente a la serie (Cuadro 15) para efectos de este ejemplo (Figura 31).

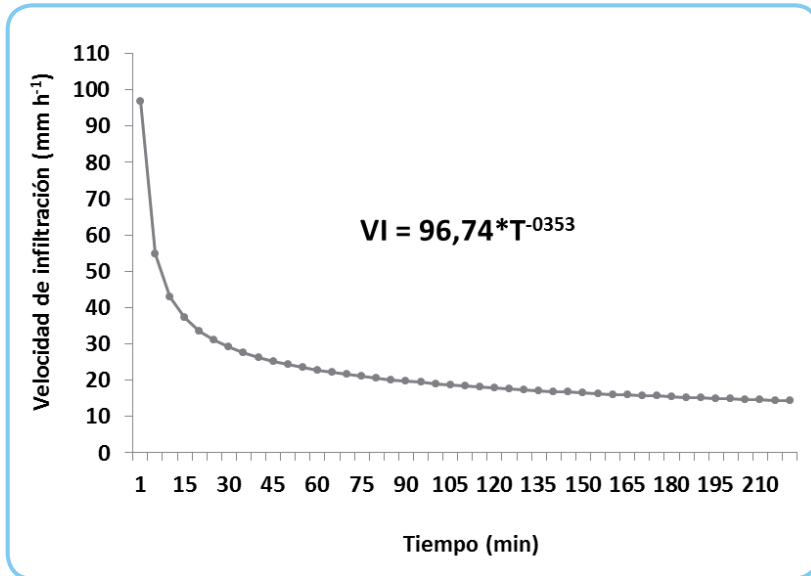


Gráfico 11. Curva característica de la velocidad de infiltración del suelo (serie Pemehue).

En el caso del ejemplo, la velocidad de infiltración está definida como $VI = 96,74 * T^{-0,353}$, por lo tanto, si la intensidad de precipitación del último aspersor es de $33,54 \text{ mm hr}^{-1}$, el tiempo al cual comenzará a producirse escurrimiento superficial (T_{es}) es de:

$$T_{es} = \left(\frac{VI}{K} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)} = \left(\frac{33,54}{96,74} \right)^{\left(\frac{1}{0,353} \right)} = 20,1 \text{ min}$$

Luego la velocidad mínima ($V_{mínima}$) de desplazamiento de la máquina o equipo para que no se produzca escurrimiento superficial o encharcamiento será:

$$V_{mínima} = \left(\frac{AM}{T_{es}} \right) = \left(\frac{25}{20,1} \right) = 1,24 \text{ m min}^{-1}$$

Donde:

T_{es} es el tiempo máximo (min) para que no se produzca escurrimiento superficial o encharcamiento. La velocidad mínima es inferior a la máxima ($2,0 \text{ m min}^{-1}$), que se consigue cuando el motor de la última torre funciona permanentemente representando un 62% ($1,24/2,0 = 0,62$) de la misma. Por lo que el tiempo máximo (T_2) que tardará la máquina o equipo en dar la vuelta para esa velocidad mínima de desplazamiento será:

$$T_2 = \frac{2 * \pi * R_L +}{V_{min} * 60} = \frac{2 * 3,1416 * 350}{1,24 * 60} = 29,56 \text{ h}$$

Con lo anterior, el equipo deberá manejarse dentro de los intervalos de velocidades promedio entre 2,0 y 1,24 h o que es lo mismo entre 18,32 h rotación⁻¹ y 29,56 h rotación⁻¹ suponiendo manejarlo entre 100% y 62% con el mando de control de la velocidad de desplazamiento.

Por otro lado, la dosis bruta de agua promedio más alta que puede ser aplicada sin problemas de escorrentía o encharcamiento será la correspondiente a 29,56 h rotación⁻¹. Mientras que la dosis bruta promedio mínima se obtendrá cuando la máquina o equipo de una vuelta en 18,32 h rotación⁻¹. Así, las láminas de reposición brutas (L_b) promedios serán de:

$$L_{bmax} = 0,36 * \left(\frac{Q_o * T_2}{A} \right) * 0,36 * \left(\frac{33,86 * 29,56}{40,70} \right) = 8,85 \text{ mm riego}^{-1}$$

$$L_{bmin} = 0,36 * \left(\frac{Q_o * T_1}{A} \right) * 0,36 * \left(\frac{33,86 * 18,32}{40,70} \right) = 5,49 \text{ mm riego}^{-1}$$

Donde:

- Q_o : Caudal total del sistema (m³ h⁻¹).
- T_1 : Tiempo mínimo de rotación o revolución (h).
- T_2 : Tiempo máximo de rotación o revolución (h).
- A : Área regada por el pivote (ha).

Mientras que las láminas de reposición netas (L_n) promedios serán de:

$$L_{nmax} = L_{bmax} * E_a = 8,85 * 0,85 = 7,52 \text{ mm riego}^{-1}$$

$$L_{nmin} = L_{bmin} * E_a = 5,49 * 0,85 = 4,67 \text{ mm riego}^{-1}$$

Así, como son riegos de alta frecuencia el intervalo máximo entre riegos ($F_{r\text{máx}}$) estará dada por la siguiente relación:

$$F_{r\text{máx}} = \frac{L_{nm\text{máx}}}{ET_{cm\text{máx}}} = \frac{7,52}{5,6} = 1,34 \text{ días} \approx 1 \text{ día y 8 horas}$$

En este ejemplo AFA es de 10,7 mm para un umbral de riego de 35% (límite máximo de pérdida de humedad para no sufrir estrés hídrico) siendo superior al valor obtenido de lámina neta máxima (7,52 mm riego⁻¹) sin que haya escurrimiento superficial o encharcamiento, por lo que el máximo de déficit de manejo para este caso será de: $L_{nm\text{máx}}/HA$ (humedad aprovechable total) = 7,52/30,6 = 0,25 (25%). Lo anterior indica que el cultivo de papa estará bien regado y sin escurrimiento superficial o encharcamiento.

Hay que considerar que el inicio de los riegos va a depender principalmente de la humedad que presente un suelo después de la salida del invierno. Pero de acuerdo a los antecedentes históricos mostrados en este documento se debiera empezar a observar el contenido de humedad del suelo a partir de mediados del mes de septiembre hasta terminar aproximadamente mediados del mes de marzo según el cultivo, frutal o pradera que se tenga. El no seguimiento de estas observaciones habrá un gran riesgo que se seque el suelo y por ende las plantas del cultivo, pudiendo ser difícil la recuperación del cultivo si la falta de agua es importante y más aún si éste es durante un período fenológico crítico del cultivo o frutal.



LITERATURA CITADA

Acevedo-Opazo, C., Ortega-Farias, S. and Fuentes, S. 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 97: 956–964.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, *Irrigation and Drainage Paper 56*. United Nations FAO, Rome, 300 p. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.

ASAE. Standards. 2001. S436.1: Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center-pivot and lateral-move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Banco Mundial, 2011. Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe. 78 p. <http://www.dga.cl/eventos/Diagnostico%20gestion%20de%20recursos%20hidricos%20en%20Chile/Banco%20Mundial.pdf>

Castaño, S., Moreno, L., de la Loza, A., Aguilera, H., Jiménez, M. E. y Mediavilla, R. 2008. Evaluación de pérdidas de agua y parámetros hidráulicos mediante ensayos de infiltración en campo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (16.1): 64-71.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). 2002. Estudio Agrológico, IX Región. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago. Publicación N° 122. 338 p.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). 2003. Estudio Agrológico Tomo I y II, X Región. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago. Publicación N° 123. 407 p.

Ferreira, R. y Sellés, G. 1997. Manejo del Riego en Condiciones de Restricción Hídrica. 38 p. Serie INIA N° 67. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Centro Regional de Investigación La Platina. Santiago, Chile.

Ferreira E., Raúl, Gabriel Sellés Van Sch. 2013. Manejo de Riego para frutales: uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. 319 p. Boletín INIA N° 278. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Centros Regionales de Investigación La Platina y La Cruz. Santiago, Chile.

Holzappel, E. A., Hepp, R. F. and Mariño, M. A. 2004. Effect of irrigation on fruit production in blueberry. *Agricultural Water Management*, 67(3): 173–184.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2007. VII Censo nacional agropecuario y forestal.

Intergovernmental Panel on Climate Change (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, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (IREN) – Universidad Austral de Chile (UACH), 1978. Estudio de suelos de la provincia de Valdivia. Santiago. 178p.

Jara, J. y Valenzuela, A. 1998. Necesidades de Agua de los Cultivos. CNR-U. de Concepción. Chillán, Chile. 24 p.

Jerez, J., Sandoval, J., Peralta, J., Gallardo, J., Ferreyra, R. y Varas, E. 1994. Manual de riego para el sur de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Corporación de Fomento de la Producción. 151 p.

Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J.L., Sauer, T.J. and Ben-Gal, A. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. Agricultural and Forest Meteorology, 184: 56-70.

Matus, F. 2008. Sistema de Soporte de Decisiones para cultivos de rotación basado en Integración SIG-Modelos de Simulación-Estaciones Meteorológicas Remotas SSD-SIGMSEM. Proyecto FONDEF D06I1100.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). 2013. Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025. 40 p. <http://www.mop.cl/CentrodeDocumentacion/Paginas/default.aspx>. Consultado el 20 de Julio 2014.

Moratiel, R. 2015. Operaciones auxiliares de riego en cultivos agrícolas- UF0160. Ediciones Paraninfo S.A., España. 202 p

Nissen, J. y Mancilla, M. 2009. Factibilidad Técnica y Económica de Riego por Aspersión en Praderas Artificiales destinadas a Leche del Sur de Chile. Agro Sur 37(2): 110-125.

Pizarro, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia. 3^{ra} Edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 511 p.

Quiroga, G. 1987. Investigación Tecnología de Riego. Informe Final, Convenio INIA – FNDR IX Región. 87 p.

Simpfendörfer, C. 2001. Carretes de riego. Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Centro de Investigación Regional Carillanca. Temuco, Chile. 32p.

Tarjuelo, J. M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. 3^{ra} edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 581p.

Vidal, I. y del Canto, P. 1983. Propiedades físicas de los suelos de Nuble, VIII Región. Agricultura Técnica (Chile), 43(3): 195-202.