

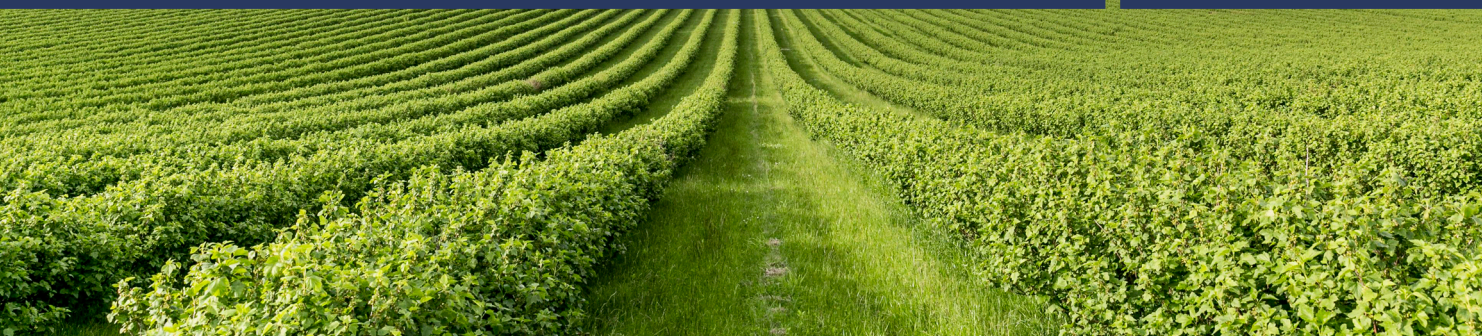
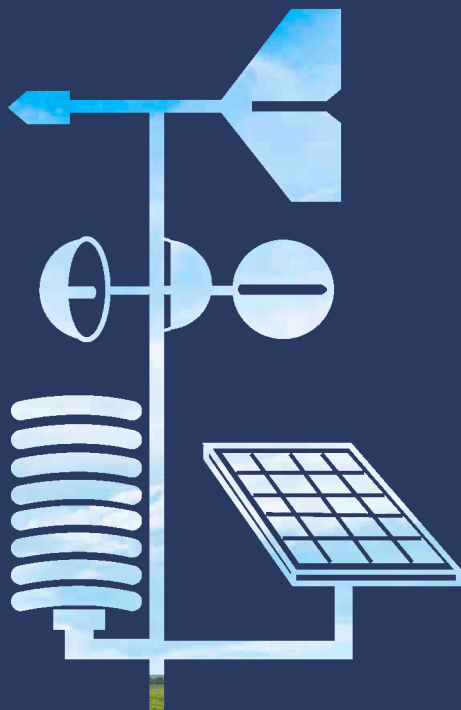


**Mejor Riego
para Chile**

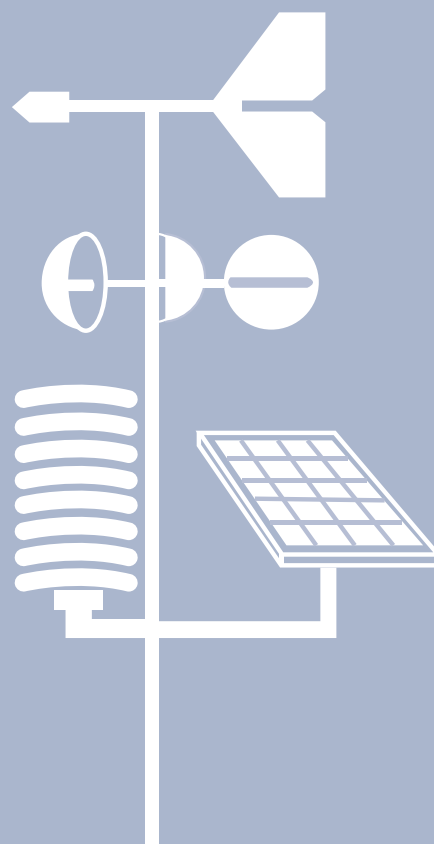
MANUAL DE PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE RIEGO TECNIFICADO.

Programa

Transferencia tecnológica en programación y control de riego tecnificado.
VALLE DEL MAULE



Este manual ha sido elaborado en el marco del programa “Transferencia tecnológica en programación y control de riego tecnificado” desarrollado por la Comisión Nacional de Riego y tiene como propósito transferir conocimientos relacionados con la aplicación de tecnología de monitoreo del estado hídrico de cultivos para mejorar la programación y control del riego.



Autores

Octavio Lagos Roa
PhD. Ingeniero Civil Agrícola
Consortio Tecnológico del Agua
Universidad de Concepción

Andrés Pérez Barriga
Mag. Ingeniero Civil Agrícola
Consortio Tecnológico del Agua
Universidad de Concepción

Camilo Souto Escalona
Dr. Ingeniero Civil Agrícola
Consortio Tecnológico del Agua
Universidad de Concepción

Walter Valdivia Cea
Dr. Ingeniero Agrónomo
Universidad de Concepción

Jorge Ulloa Contreras
Consortio Tecnológico del Agua
Ingeniero Civil Telemático
LemSystem

Duilio Gadaleta Maturana
Ingeniero Agrónomo
LemSystem

Lea Valenzuela López
Diseñadora Gráfica
Universidad de Concepción

Supervisión del programa

Gustavo Roa Figueroa
Ingeniero Agrónomo
Comisión Nacional de Riego

La ejecución del programa y elaboración de este material ha sido desarrollado por el Consorcio Tecnológico del Agua y el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción.

Introducción

Ante un escenario de disminución de la disponibilidad de agua, con decrecimiento de las precipitaciones en la macrozona Centro- Sur de Chile, entre 100 y 400 mm en los últimos 10 años (Vásquez, 2019), la cantidad de agua dulce se verá restringida, y su uso para fines domésticos será prioritaria, disminuyendo la disponibilidad de agua para riego. En Chile se estima que a la fecha sólo un 40% de la superficie regada utiliza sistemas de riego presurizados, infiriendo que gran parte del consumo de agua para riego (80%) se debe a las ineficiencias de los sistemas utilizados.

El clima privilegiado y la ubicación estratégica de nuestro país son elementos fundamentales en las características de nuestra producción frutícola. Noches frías y días calurosos típicos de la zona central otorgan los requerimientos necesarios de horas de frío para la producción frutícola. Por otra parte, la ubicación geográfica permite ofrecer productos frescos, de alta calidad, a los países consumidores ubicados en el hemisferio norte cuando se ha terminado la producción local.

Chile posee relaciones comerciales con gran parte de los países del hemisferio norte lo cual otorgar posibilidades excepcionales para que nuestros productores puedan exportar sus productos cumpliendo con los estándares internacionales de calidad. Ello significa entonces que, ahora más que nunca, los agricultores deberán hacer esfuerzos especiales para manejar en forma óptima los distintos factores que inciden en la producción.

De acuerdo con las experiencias desarrolladas, los agricultores realizan un menor control al agua de riego en sus procesos productivos, siendo que el agua es uno de los factores que impacta mayormente el rendimiento y la calidad del producto que se desea obtener.

Es así como el éxito del uso eficiente de los recursos hídricos en un predio se basa en gran parte en una buena planificación y manejo del agua, la cual debe considerar la elección y el diseño del método de riego bajo criterios de manejo y operación adecuados, lo que debe permitir que los requerimientos del cultivo se apliquen en forma correcta, evitando pérdidas de agua, lo que induce a determinar frecuencia y tiempos de riego, acorde con el cultivo y la disponibilidad de agua. Así los conocimientos de los principios de programación de riego son esenciales para desarrollar y aplicar un plan de gestión de los recursos hídricos en el predio. La determinación precisa y continua del contenido de agua del suelo, variables medio ambientales, monitoreo del estado hídrico del cultivo y desarrollo del fruto y variables de operación del sistema de bombeo son condiciones esenciales para una gestión eficiente del riego. El seguimiento de estas variables puede ser monitoreado en tiempo real y ser visualizadas en una plataforma web, vía telefónica y/o una aplicación (App).

Este tipo de herramientas permiten facilitar la toma de decisiones en torno a la programación de riego, integrando la información temporal y espacialmente para una aplicación de agua precisa que necesite el cultivo, pudiendo ser utilizada por profesionales y agricultores. Sin embargo, la brecha existente entre la tecnología disponible y su real usabilidad por parte de los usuarios se puede resolver mediante distintas metodologías de transferencia tecnológica. Considerando los aspectos indicados anteriormente, el objetivo general de este Manual de Programación y Control de Riego es presentar y desarrollar conceptos de manejo y control de riego para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego intrapredial de los agricultores de los valles de los ríos Limarí y Maule a través de la aplicación de tecnología de monitoreo del estado hídrico de sus cultivos para una correcta programación y control del riego.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. Conceptos generales de riego y relaciones hídricas suelo-planta-atmósfera.	6
Textura y estructura de suelo.	7
Textura de suelo.	7
Estructura de suelo.	8
Importancia de la estructura y textura.	8
Pedregosidad.	8
Método práctico para determinar textura de suelo.	9
Humedad aprovechable para la planta.	10
Densidad aparente.	10
Concepto de humedad del suelo.	10
Profundidad de raíces.	12
Sensibilidad de un cultivo a la falta o exceso de agua.	12
Factores climáticos y evapotranspiración (demanda de agua).	14
Factores climáticos.	14
Concepto de evapotranspiración y evapotranspiración de referencia.	15
Concepto de altura o lámina de agua en milímetros (mm).	15
Visualización de la evapotranspiración.	16
Determinación de requerimiento hídrico de una planta.	17
Caracterización del suelo.	17
Caracterización del ambiente.	17
Caracterización de la demanda de agua de un cultivo.	18
Determinación del requerimiento hídrico y su variabilidad estacional.	18
CAPÍTULO 2. Conceptos de programación, evaluación y elementos de control en un sistema de riego localizado.	19
Frecuencia y tiempos de riego.	20
Importancia de la programación del riego.	20
Conceptos de frecuencia y tiempos de riego.	20
Variación espacial de suelos.	22
Variación de los suelos en el predio.	22
Sectorización del sistema de riego.	23
Eficiencia de aplicación y uniformidad del riego.	25
Eficiencia de aplicación.	25
Uniformidad del riego.	26
Evaluación de la uniformidad del riego.	26
Determinación de la uniformidad del cuarto menor.	28
Control de riego.	30
Elementos de medida.	30
Elementos de control.	31
Elementos de protección.	32
Automatización de sistemas de riego.	33
Estrategias básicas de control.	33
Componentes del sistema de automatización.	33
Validación del buen funcionamiento de los componentes.	34
Programación de riego.	35
Validación de la ejecución del riego.	35

CAPÍTULO 3. Sensores de clima, humedad de suelo y planta.Instalación y telemetría.	36
Sensores de variables agroclimáticas.	37
Identificación de sensores agroclimáticos.	37
Instalación de una estación agrometeorológica.	37
Sensores instalados en una estación agrometeorológica.	38
Sensores para medir la humedad del suelo.	41
Tensiómetros.	42
Sensores eléctricos.	43
Sensores para medir el estado hídrico del cultivo y desarrollo del fruto.	46
Dendrómetro.	46
Potencial hídrico de la planta.	47
Mantenimiento de sensores de clima, suelo y planta.	49
Mantenimiento de la estación agrometeorológica.	49
Mantenimiento sensores de humedad.	51
Mantenimiento de sensores del estado hídrico del cultivo.	51
CAPÍTULO 4. Procesamiento de datos de campo y recomendaciones de riego.	52
Programación de riego en base a información de estaciones agrometeorológicas.	53
Control y monitoreo del riego en base a información de sensores de humedad de suelo.	57
Control de riego en base a información de sensores de planta.	61
Dendrómetro.	61
Microtensiómetro FloraPulse®.	62
Control y Monitoreo mediante el uso de imágenes satelitales y drones.	64
Imágenes satelitales.	64
Plataforma Agrícola Satelital de Chile (PLAS).	66
Imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados (UAVs o drones).	67
CAPÍTULO 5. Beneficios económicos y productivos de la programación y control del riego tecnificado.	69
Costos de implementación de tecnologías para la programación y control del riego.	70
Costos de inversión inicial	70
Costos anuales de implementación, capacitación y uso de la tecnología	71
Consideraciones para invertir en telemetría	73
Ahorros y beneficios directos de tecnologías de programación y control del riego.	75
Relación agua – producción y sus beneficios.	79
Beneficios del manejo eficiente del agua	80
Calidad de la producción y sus beneficios	82
Beneficios de la calidad de la producción.	84



CAPÍTULO 1

Conceptos generales de riego y relaciones hídricas suelo-planta-atmósfera.

Programa
Transferencia tecnológica en programación
y control de riego tecnificado.

Textura y estructura de suelo

El suelo se define como el material orgánico o mineral no consolidado en la superficie inmediata de la Tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas terrestres. A continuación, se describen algunas características del suelo como textura, estructura, y la importancia de la pedregosidad.

Textura de suelo.

El suelo es un material poroso, compuesto principalmente por una fracción sólida y una fracción porosa, ocupando ambas partes o la totalidad de los poros (Figura 1A). Las distintas partículas minerales del suelo pueden ser clasificadas según su tamaño en tres grupos: arenas, limos y arcillas (Figura 1B).

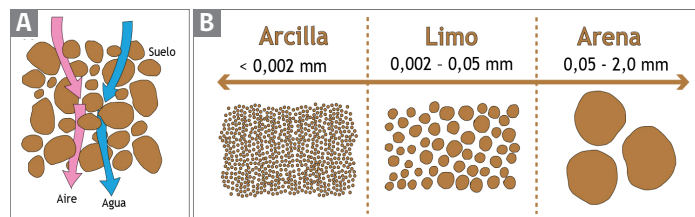


Figura 1. Composición del suelo (A) y tamaño de partículas (B).

El triángulo textural es utilizado para determinar la textura de un suelo. Por ejemplo, si el resultado de un análisis textural de suelo entrega un 20% de arcilla, 40% de arena y 40% de limo, el suelo de acuerdo con el triángulo de textura es clasificado como un suelo franco. Para aplicar el triángulo textural (Figura 2), seleccionamos primero cualquiera de los 3 componentes, por ejemplo, el porcentaje de arena (40%), luego nos movemos hacia la arcilla para interceptar con la horizontal proveniente de la arcilla (20%), o con la diagonal que viene del limo (40%). Basta con dos componentes para determinar una textura ya que el tercero se obtiene indirectamente.

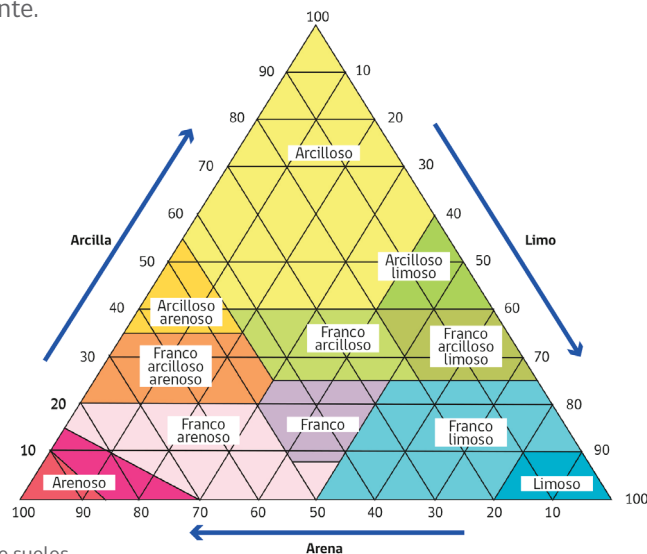


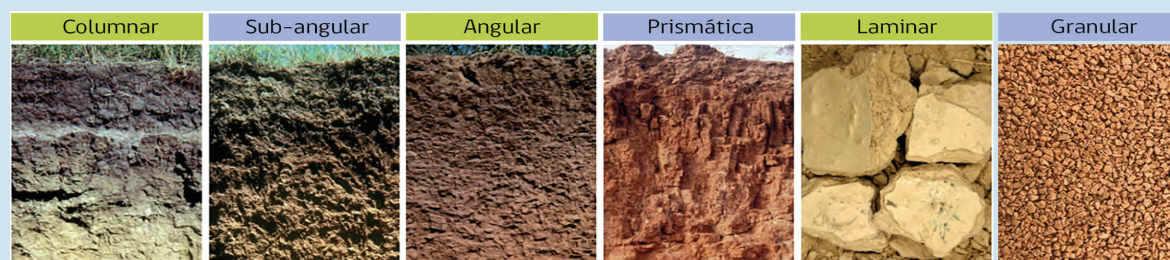
Figura 2. Triángulo textural de suelos.

Estructura de suelo.

La estructura del suelo se refiere a cómo las partículas del suelo se agrupan en “agregados”. Estos agregados, están cementados o unidos por procesos físicos, químicos y biológicos. También, la materia orgánica y las raíces de las plantas son clave para la estructura del suelo. La estructura del suelo se clasifica por tipo (forma), clase (tamaño) y grado (fuerza de cohesión) de los agregados. La forma, el tamaño y la resistencia de los agregados determinan la estructura de los poros y la facilidad con que el aire, el agua y las raíces se mueven a través del suelo.

Según su estructura los suelos se clasifican en:

- ✓ Sin estructura.
- ✓ Estructura granular; gránulos más o menos esféricos.
- ✓ Laminar; se forman agregados aplanados.
- ✓ Estructura prismática; con agregados poliédricos más o menos regulares (angulares y subangulares).
- ✓ Si tiene aspecto de columna se llama columnar.



Fuente: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2020/01/03/propiedades-fisicas-del-suelo/>

Importancia de la estructura y textura.

En la textura arcillosa las partículas son tan pequeñas que se produce compactación del terreno (suelo casi sin poros) y asfixia de las raíces, en estos suelos comúnmente ocurre una mayor retención de humedad.

Por otro lado, el almacenamiento y la redistribución del agua están en función del espacio poroso del suelo y la distribución del tamaño de los poros, que se rigen por la textura y la estructura. En términos generales, los suelos ricos en arcilla tienen el mayor espacio poroso y, por lo tanto, la mayor capacidad total de retención de agua. Por otra parte, en la textura arenosa las partículas dejan muchos espacios entre ellas siendo un suelo tan permeable que el agua baja en profundidad donde no tienen acceso las raíces, esto provoca que los suelos arenosos tengan una muy baja capacidad de retener agua en el tiempo. Los mejores suelos en cuanto a porosidad y permeabilidad son aquellos con una buena estructura que deje suficientes poros y con textura franca que es equilibrada con poros de todos los tamaños para el agua y el aire.

Pedregosidad.

La presencia de piedras en el perfil del suelo afecta importantes características y por ende el rendimiento de cultivos. En términos generales, la pedregosidad del suelo está dada por la presencia de fragmentos de roca o “piedras” con diámetro, equivalente, igual o mayor que 2 mm. La pedregosidad afecta propiedades del suelo como: densidad, propiedades físicas e hidráulicas, temperatura, la susceptibilidad a la erosión, y condiciones que afectan el volumen de enraizamiento de las plantas.

Método práctico para determinar textura de suelo.

Para estimar la textura de una muestra de suelo, separe primero la tierra fina (todas las partículas de menos de 2 mm), de las partículas mayores como la grava y las piedras. La tierra fina es una mezcla de arena, limo y arcilla. Para realizar los ensayos de campo asegúrese de utilizar sólo tierra fina. Luego, siga los pasos de la Figura 3.



Coloque aproximadamente 25 g de suelo en la palma de la mano. Agregue agua gota a gota y amase la muestra de suelo para romper todos los agregados. El suelo se encuentra en la consistencia adecuada cuando es plástico y moldeable, como masilla húmeda.

Agregue suelo seco para absorber el exceso de agua

¿Se disgrega la muestra de suelo al apretarla?

Si

¿Está el suelo muy seco?

Si

¿Está el suelo muy mojado?

No

Arenosa

Coloque la muestra de suelo entre el pulgar y el índice y empujelo suavemente con el pulgar, presionándolo hacia arriba para formar una cinta. Forme una cinta de espesor y ancho uniforme. Deje que la cinta salga y se extienda sobre el dedo índice, quebrándose por su propio peso.

Areno francosa

¿Forma el suelo una cinta?

No

Si

¿Forma el suelo una cinta débil menor de 2.5 cm de largo antes de quebrarse?

No

Si

¿Forma el suelo una cinta media de 2.5-5 cm de largo antes de quebrarse?

No

Si

¿Forma el suelo una cinta fuerte de 5 cm o más de largo antes de quebrarse?

Si

Sature con agua una pequeña porción de la muestra en la palma de la mano y frote con del dedo índice.

¿Siente el suelo muy arenoso?

Franco arenosa

Si

No

¿Siente el suelo muy arenoso?

Franco arcilloso arenosa

Si

No

¿Siente el suelo muy arenoso?

Arcilloso arenosa

Si

No

¿Siente el suelo muy suave?

Franco limosa

Si

No

¿Siente el suelo muy suave?

Franco arcilloso limosa

Si

No

¿Siente el suelo muy suave?

Arcilloso limosa

Si

No

No predomina ni lo arenoso ni lo suave

Franco

Si

No predomina ni lo arenoso ni lo suave

Franco arcillosa

Si

No predomina ni lo arenoso ni lo suave

Arcillosa

Si



Figura 3. Método del tacto para determinación de textura de suelo.

Humedad aprovechable para la planta

Densidad aparente.

La densidad aparente se define como la relación que existe entre el peso de una muestra de suelo seco y el volumen que ocupa dicha muestra. El volumen incluye tanto las partículas sólidas como el espacio poroso existente entre ellas, definido en gran medida por la textura del suelo y por el grado de agregación entre las partículas del suelo conocido como su “estructura”.

A diferencia de la textura, la densidad aparente es una propiedad que varía con las condiciones estructurales del suelo, las que dependen de condiciones de manejo, tales como el paso de maquinaria u otras labores agrícolas. Por ejemplo, a menor densidad aparente y menor peso del suelo habrá más espacio poroso sin utilizar; por el contrario, a mayor densidad aparente y mayor peso del suelo habrá menos espacio poroso sin utilizar (Figura 4A). Este parámetro puede servir como un indicador del grado de compactación que tiene el suelo y la restricción relativa al desarrollo de las raíces de las plantas. Una elevada compactación de suelo puede afectar el rendimiento del cultivo (Figura 4B).

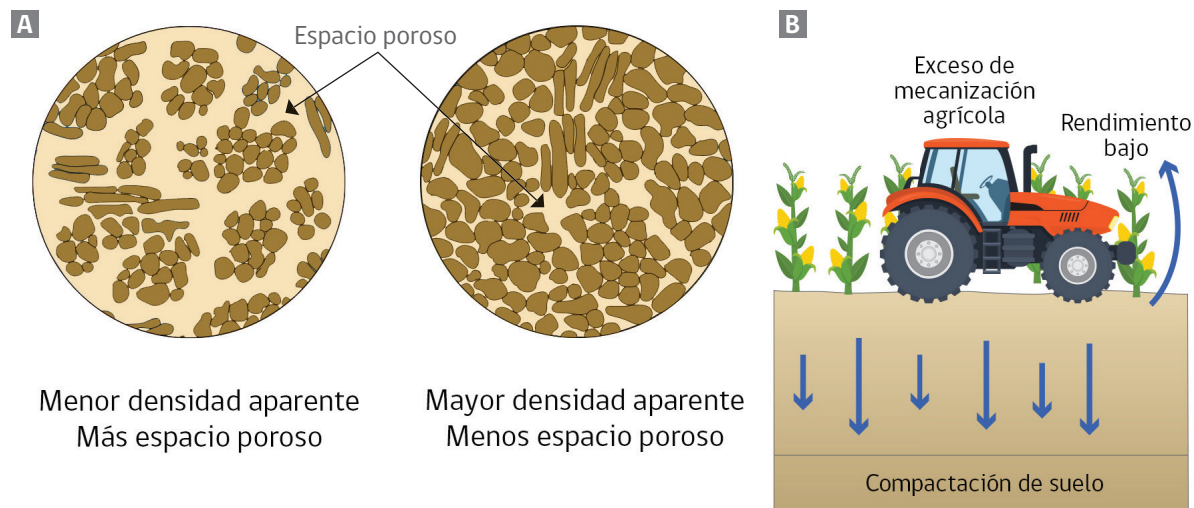


Figura 4. Relación densidad aparente y espacio poroso (A) y compactación de suelo (B).

Concepto de humedad del suelo.

El contenido de humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua que contiene. La humedad del suelo depende exclusivamente de los aportes de agua que reciba (riego o lluvia) y de las extracciones que realice el cultivo (transpiración) y/o evapore el suelo.

La relación que existe entre el suelo y la planta responderá preguntas como ¿cuándo regar?, por otro lado, la relación que existe entre el cultivo y la atmósfera responderá preguntas como ¿cuánto regar? Conocer el suelo, el cultivo y el ambiente permitirá realizar una correcta programación del riego lo que llevará a un buen desempeño productivo del cultivo.

CAPACIDAD DE CAMPO.

El contenido de humedad a capacidad de campo (CC) es la humedad del suelo después de 24 a 48 horas de haber sido mojado abundantemente y se ha dejado drenar el agua libremente. En otras palabras, capacidad de campo se define como la máxima cantidad de agua que un suelo es capaz de retener.

PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE.

El contenido de humedad a punto de marchitez permanente (PMP) es la humedad del suelo en la que la planta se marchita y ya no es capaz de recuperar su turgencia. En otras palabras, es el contenido de humedad del suelo, en el que la planta se marchita a pesar de regarla después de alcanzado este punto. Un suelo a PMP se ve extremadamente seco, pero aun así contiene agua en una muy pequeña cantidad imposible de ser extraída por el cultivo.

RETENCIÓN DE HUMEDAD O HUMEDAD APROVECHABLE.

Al considerar capacidad de campo y punto de marchitez permanente como un límite superior e inferior de almacenamiento de agua en el suelo, el contenido de agua que está entre estos dos límites se define como humedad aprovechable o agua útil (HA) que puede ser consumida por las plantas (Figura 5). Estos límites variarán dependiendo de la textura del suelo. En suelos arcillosos la humedad aprovechable es mayor que en suelos arenosos (Tabla 1).

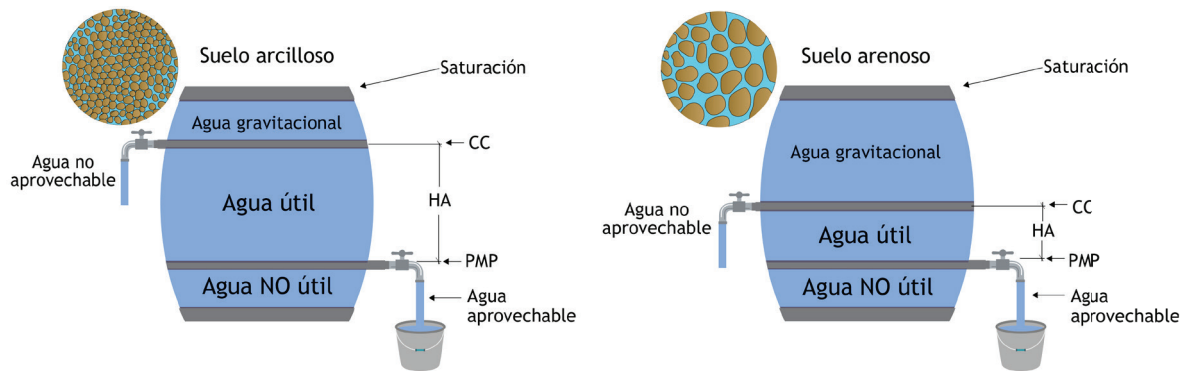


Figura 5. Esquema de definición de capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable o agua útil (HA).

Tabla 1. Densidad aparente (Mg/m³), capacidad de campo (%volumen), punto de marchitez permanente (%volumen) y volumen de agua aprovechable (L/m³ de suelo).

Tipos de suelo	Densidad aparente (Mg/m ³)	Capacidad de campo (%)	Punto marchitez permanente (%)	Volumen de agua aprovechable (L/m ³ de suelo)
Arenoso	1,55 - 1,80	6 - 12	2 - 6	90
Franco - arenoso	1,40 - 1,60	10 - 18	4 - 8	120
Franco	1,35 - 1,50	18 - 26	8 - 12	170
Franco - arcilloso	1,30 - 1,40	23 - 31	11 - 15	190
Arcilloso - arenoso	1,25 - 1,35	27 - 35	13 - 17	210
Arcilloso	1,20 - 1,30	31 - 39	15 - 19	230
Trumao	0,90 - 1,24	45 - 60	15 - 33	280

Profundidad de raíces.

Las raíces son en su mayoría órganos subterráneos adaptados para absorber agua, nutrientes y anclar a la planta al suelo. Para tener una buena programación del riego se necesita conocer la profundidad efectiva de raíces en cada período de tiempo analizado. La profundidad efectiva de las raíces determinará la profundidad del suelo desde donde se extrae agua. Por ejemplo para un cultivo anual la profundidad de raíces cambia rápidamente con el tiempo, desde que emerge hasta que madura (Figura 6).

Ejemplo: si el suelo tiene 1,80 m de profundidad, pero el cultivo está en una etapa temprana de desarrollo (por ejemplo, 20 cm de profundidad de raíces), el valor a considerar para el riego es 20 cm, es decir, donde se encuentran las raíces que efectivamente extraen el agua.

En el caso de frutales, una vez que las plantas se encuentran en su segundo año o más de producción, las raíces se encuentran establecidas y serán consideradas así para el resto de la temporada. En frutales la profundidad de las raíces depende, principalmente, del patrón de injerto, tipo de suelo y método de riego.

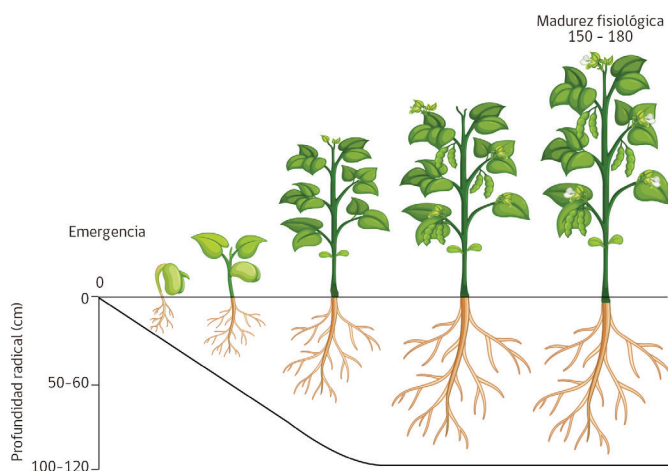


Figura 6. Profundidad de raíces para un cultivo anual, por ejemplo, maíz.

Sensibilidad de un cultivo a la falta o exceso de agua.

El concepto de HA de cada suelo da origen a una definición de criterio de reposición de agua, es decir un punto en el cual la planta extrae este recurso del suelo desde el estado de capacidad de campo a un punto definido de acuerdo con el tipo de cultivo/frutal y su manejo. A esto se le denomina Criterio o Umbral de riego (CR).

En general, se sugiere un valor de 50% ($CR = 0,5$) lo que significa que se permitirá deprimir la humedad del suelo un 50% de la HA para volver a regar. Si el CR es menor que un 50%, por ejemplo 30% ($CR = 0,3$), significa que se permitirá deprimir un 30% de la HA, esto último es característico en riego de cultivos sensibles a un déficit de agua. Por el contrario, CR mayores a un 50%, por ejemplo 60% ($CR = 0,6$), es común en riego de cultivos que soportan de mejor manera un estrés hídrico. En la Tabla 2 se muestran ejemplos de diferentes cultivos, hortalizas y frutales con valores de profundidad radicular efectiva y criterios de riego.

Tabla 2. Criterio de riego (CR) y profundidad efectiva de raíces de cultivos y frutales.

Cultivo	CR	Profundidad efectiva de raíces (cm)
Ají	0,50	60
Ajo	0,50	60
Alcachofa	0,50	100
Alfalfa	0,65	100
Arándanos	0,30	40 - 50
Arveja	0,60	60
Avellano Europeo	0,50	60
Brócoli	0,50	60
Cebolla	0,50	60
Cerezos	0,40	60 - 70
Cítricos	0,50	30 - 70
Coliflor	0,50	60
Espárragos	0,50	100
Empastadas	0,65	60
Porotos	0,50	90
Frutilla	0,50	60
Habas	0,60	80

Cultivo	CR	Profundidad efectiva de raíces (cm)
Kiwi	0,30	60
Lechugas	0,40	60
Maíz	0,65	100
Manzano	0,50	60 - 70
Melón	0,50	90
Menta	0,35	60
Nogal	0,40	70 - 80
Olivo	0,35	60 - 80
Paltos	0,35	70 - 80
Papas	0,30	60
Pimiento	0,50	60
Repollo	0,50	60
Sandía	0,50	100
Trigo de invierno	0,65	100
Trigo de primavera	0,65	90
Zanahoria	0,50	90
Zapallo	0,50	100

Factores climáticos y evapotranspiración (demanda de agua)

Los factores climáticos inciden en la relación suelo-planta-atmósfera. Este concepto analiza el movimiento del agua desde el suelo, pasando por las plantas hasta la atmósfera. La planta funciona como el medio de transporte, absorbiendo el agua por las raíces y liberándola a la atmósfera a través de las hojas, proceso llamado transpiración, y es esta agua transpirada la que se debe reponer a través del riego, de tal forma de asegurar el correcto abastecimiento de agua y favorecer un alto rendimiento en los cultivos.

La aplicación de agua debe ser concordante con lo requerido por las plantas, ya que de esta forma existirá un ahorro de agua y energía. A continuación, se muestra el movimiento del agua en el suelo-planta-atmósfera (Figura 7).

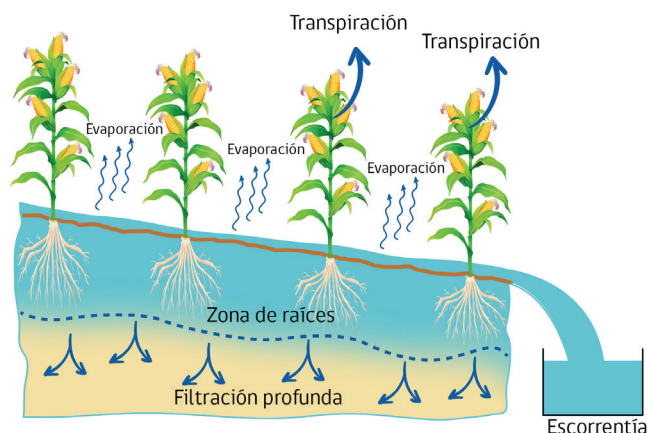


Figura 7. Movimiento del agua en el suelo-planta-atmósfera.

Factores climáticos.

Los factores climáticos sirven para poder determinar la demanda de agua y responde a preguntas como ¿cuánto regar? La comprensión de la variación de los parámetros ambientales es clave para poder evaluar y definir su interacción con el cultivo, por ejemplo, al contar con datos de estaciones meteorológicas se pueden determinar los requerimientos hídricos de las plantas. Los parámetros más importantes del clima, que afectan a la demanda de agua de los cultivos son:

- ✓ Radiación solar.
- ✓ Temperatura y humedad relativa del aire.
- ✓ Velocidad del viento.
- ✓ Precipitación.

Estos antecedentes, sumados a las características de los cultivos, como el tipo de cultivo, variedad, estado de desarrollo y sistema de formación, nos permitirán determinar la **evapotranspiración**. La evapotranspiración es un término integrado, compuesto por la precipitación interceptada por las cubiertas vegetales, los flujos de vapor de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. Conociendo la evapotranspiración podemos saber el requerimiento de agua del cultivo/frutal (Figura 8).

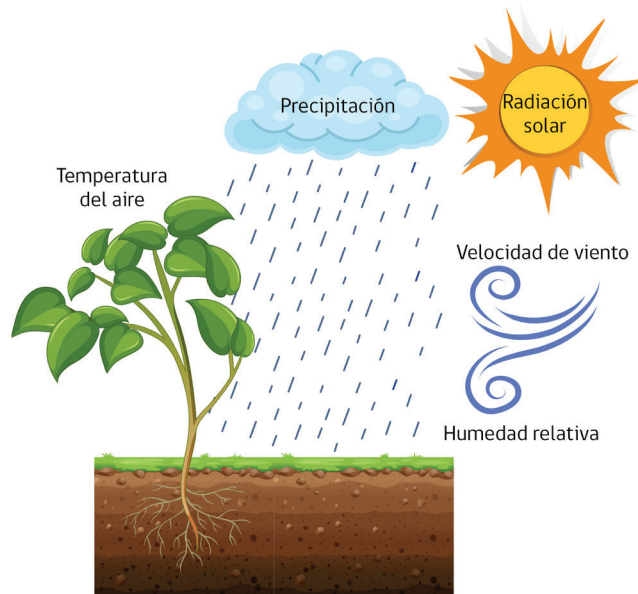


Figura 8. Factores ambientales para considerar en la determinación de la evapotranspiración (ET).

Concepto de evapotranspiración y evapotranspiración de referencia.

Las necesidades hídricas de una planta se determinan a través de la evapotranspiración (ET). Para estimarla se utiliza el concepto, consensado por expertos, de evapotranspiración de referencia (ETo). El concepto de ETo corresponde a la ET de un cultivo de pasto corto de 10 cm de altura o alfalfa de 50 cm de altura con 100% de cobertura, bien regado (es decir sin déficit de agua). La ETo varía de acuerdo con las condiciones climáticas y geográficas donde se encuentre el predio. Existen portales en internet disponibles para todo agricultor donde pueden consultar por la ETo de forma gratuita, algunos de los cuales son: www.agroclima.cl, www.agromet.cl, www.agrometeorologia.cl y aplicaciones para celulares como CampoClima.

Al considerar un cultivo en particular se debe tener en cuenta el desarrollo fenológico del cultivo/ frutal, llamado coeficiente de cultivo (Kc). El Kc generalmente varía entre 0 – 1,2 y su valor dependerá del: desarrollo fenológico, sistema y manejo de riego y laboreo agronómico.

Concepto de altura o lámina de agua en milímetros (mm).

La ET se expresa en unidades de milímetros por día (mm/día), lo que corresponde a un volumen por área y por unidad de tiempo, para este caso normalmente se utiliza $L/m^2/día$, y esta relación se explica en la Figura 9. En ella se observa que el volumen de agua que ocupa una lámina de 1 mm de altura sobre una superficie de $1 m^2$ es 1 litro. Es decir si requerimos aplicar a un cultivo una lámina de 6 mm en 1 día (6 mm/día), es equivalente a reponer 6 litros de agua por cada m^2 en 1 día.

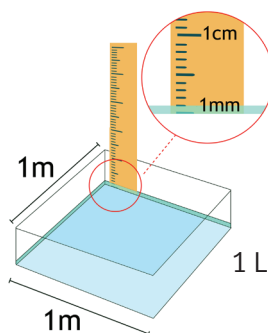


Figura 9. Representación de la unidad de medida milímetros (mm) y su equivalencia en unidad de volumen (L) por unidad de superficie ($1 m \times 1 m = 1 m^2$).

Visualización de la evapotranspiración.

Existen diferentes maneras de visualizar datos de ET, por ejemplo, a continuación se muestra una manera de visualizar los datos de la estación meteorológica en el sitio web de INIA (www.agrometeorologia.cl). Los pasos a seguir son:

- ✓ **Paso 1).** Ingresar al sitio en internet: www.agrometeorologia.cl.
- ✓ **Paso 2).** Seleccionar “Frutales y cultivos”.
- ✓ **Paso 3).** Hacer click en “ET₀”. Inmediatamente se mostrarán valores de ET₀ en el mapa al costado izquierdo de la pantalla. Los colores de cada estación (círculo en el mapa) muestra la cantidad de ET₀ durante el día, los colores más azules significan menor ET₀ mientras que colores más rojizos muestran valores mayores.
- ✓ **Paso 4).** Buscar la zona geográfica donde se encuentra el predio y seleccionar la estación de referencia más cercana, por ejemplo, la estación “Miraflores, Longaví INIA”.
- ✓ **Paso 5).** Inmediatamente aparecerá una figura con barras al costado derecho de la pantalla que muestra la ET₀ de los últimos 7 días, incluyendo el día actual. Si desea conocer la ET₀ de los últimos 7 días puede sumar cada barra de color celeste, el resultado final nos dirá la cantidad de mm evapotranspirados en ese período.

Para el caso del ejemplo la ET₀ en los 7 días fue 45,3 mm.

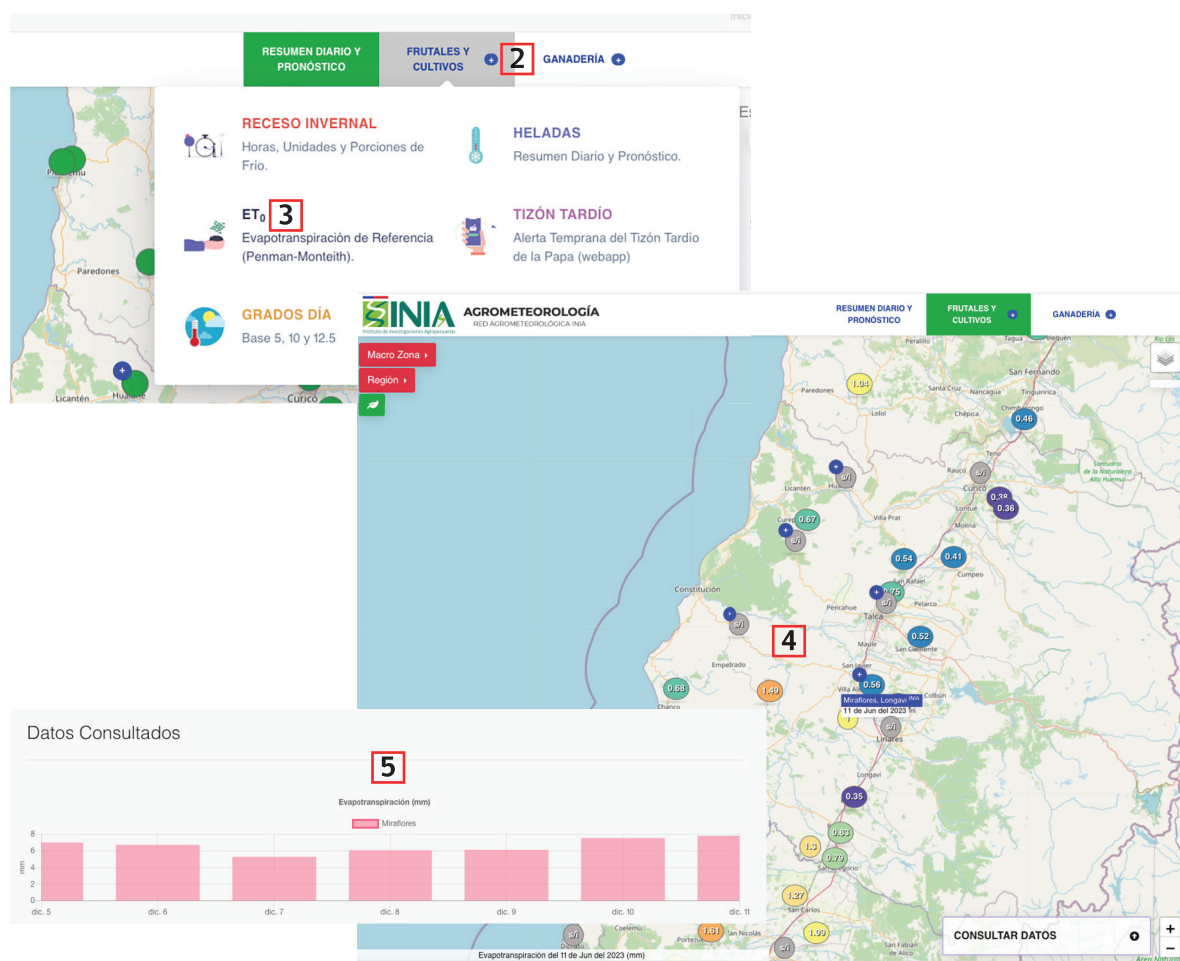


Figura 10. Visualización de la evapotranspiración de referencia en el sitio web www.agrometeorologia.cl.

Determinación de requerimiento hídrico de una planta

Las relaciones hídricas en cultivos y frutales son un aspecto fundamental en la comprensión de los requerimientos hídricos de las plantas, la relación que existe entre el suelo y la planta responderá preguntas como ¿cuándo regar?, por otro lado, la relación que existe entre el cultivo, el sistema de riego y la atmósfera responderá preguntas como ¿cuánto regar? Conocer el suelo, el cultivo y el ambiente permitirá realizar una correcta programación del riego lo que llevará a un buen desempeño productivo.

Caracterización del suelo.

El suelo es un medio poroso que tiene varios objetivos dentro de la producción agrícola, por ejemplo, es el encargado de proveer agua y nutrientes al cultivo y también es el sostén para las raíces. Para efectos de programación del riego, se deben conocer la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y textura.

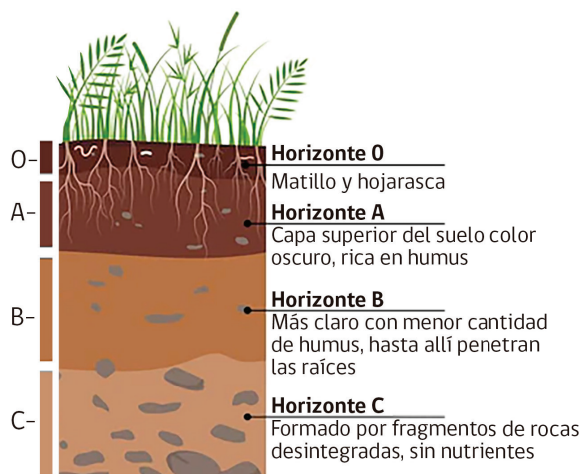


Figura 11. Suelo característico.

Caracterización del ambiente.

La comprensión de la variación de los parámetros ambientales también es clave para poder evaluar y definir su interacción con el cultivo y/o frutal. Como se mencionó anteriormente, las variables más importantes del clima que afectan a la demanda de agua de los cultivos son: radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa del aire y velocidad del viento. En la Figura 12 se observa una estación meteorológica automática (EMA) con la cual se puede medir las variables del clima mencionadas anteriormente. Es importante destacar que la EMA debe estar instalada en condiciones de referencia, es decir, sobre un pasto corto (0,1 m de altura) bien regado con una área despejada de al menos 50 m sobre la dirección de los vientos predominantes.



Figura 12. Estación meteorológica automática (EMA).

Caracterización de la demanda de agua de un cultivo.

Las necesidades hídricas de un cultivo se determinan a través de:

- ✓ Evapotranspiración de referencia (ET₀).
- ✓ Coeficiente de cultivo (K_c).
- ✓ Evapotranspiración de cultivo (ET_c).

La ET₀ se determina a partir de las estaciones meteorológicas y considerando el cultivo a través del coeficiente de cultivo (K_c) se puede obtener la ET de cultivo (ET_c).

El coeficiente de cultivo variará dependiendo de la especie, su estado de desarrollo, marco de plantación, sistema de conducción, entre otros. Sin embargo, múltiples estudios han determinado que la etapa de desarrollo es la que más influye en el valor del K_c. A medida que el cultivo se desarrolla, el coeficiente de cultivo variará a lo largo de una temporada de crecimiento, tanto para especies anuales y perennes (Tabla 3). Otra manera de obtener K_c para distintos periodos es a través de la plataforma PLAS de INIA. (<https://www.agrisatwebgis.com/app/agrisat/login>)

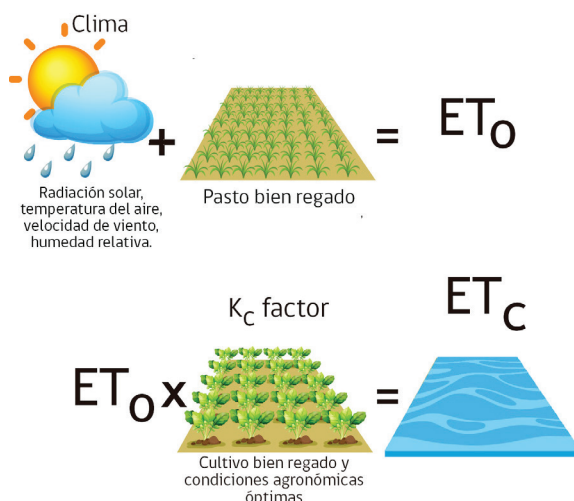


Figura 13. Esquema general de la estimación de la ET de referencia (ET₀) y ET de cultivo (ET_c).

Tabla 3. Coeficientes de cultivo (K_c) de los principales frutales cultivados en el valle del Maule, Chile.

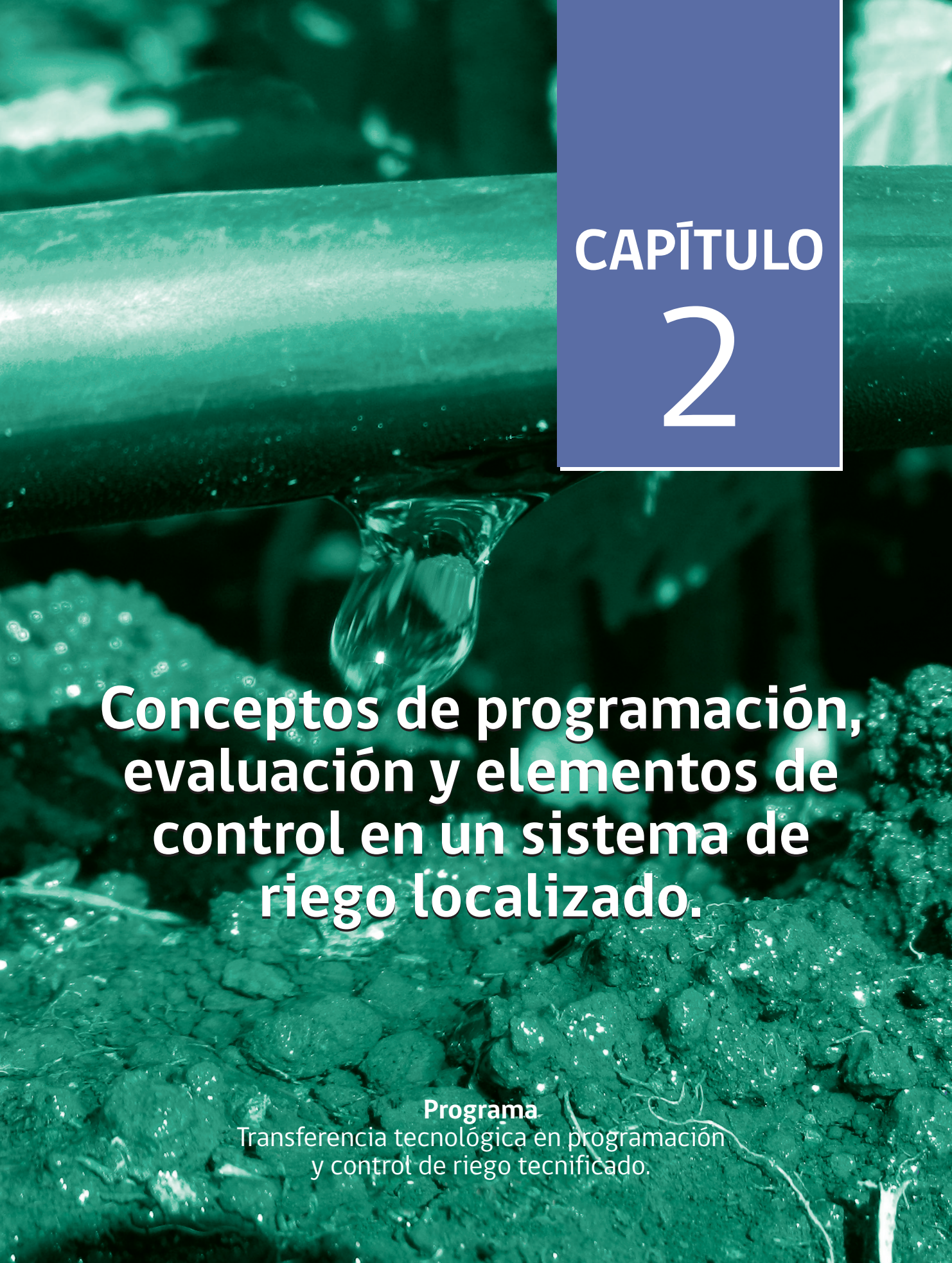
Cultivo	K _c etapa inicial	K _c etapa media	K _c etapa final
Arándano Americano	0,40	0,85	0,35
Avellano	0,55	0,95	0,70
Cerezo	0,50	1,10	0,85
Ciruelo	0,45	1,00	0,70
Frambuesa	0,45	0,75	0,60
Kiwi	0,55	0,95	0,75
Manzano	0,60	1,00	0,70
Nogal	0,50	1,10	0,60
Olivo	0,50	0,65	0,50
Peral	0,45	0,90	0,65

Determinación del requerimiento hídrico y su variabilidad estacional.

El requerimiento hídrico se determina para poder cuantificar el volumen de agua necesario para poder abastecer a una planta en cuanto a sus necesidades diarias y así mantener un estado hídrico óptimo. Incorporando la ET_c calculada a partir de la ET₀ y el K_c del cultivo, se podrá determinar el requerimiento del cultivo día a día. Como ejemplo consideremos el cultivo de manzanos en la región del Maule y la Tabla 4 muestra el cálculo del requerimiento hídrico diario promedio del cultivo y su variación mensual a lo largo de una temporada de crecimiento.

Tabla 4. Determinación del requerimiento hídrico mensual para el cultivo de manzanos en la comuna de Talca.

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ET ₀ (mm/día)	3,7	5,0	5,9	6,2	5,5	4,3
K _c	0,45	0,60	1,00	1,00	0,80	0,70
ET _c (mm/día)	1,7	3,0	5,9	6,2	4,4	3,0



CAPÍTULO 2

Conceptos de programación, evaluación y elementos de control en un sistema de riego localizado.

Programa

Transferencia tecnológica en programación
y control de riego tecnificado.

Frecuencia y tiempos de riego

Importancia de la programación del riego.

La gestión hídrica en la agricultura, así como todas las tecnologías de riego existentes que facilitan y mejoran su ejecución, tiene como objetivo principal, la aplicación de la cantidad correcta de agua en los momentos oportunos, en función de las necesidades del cultivo. En este contexto, la frecuencia y el tiempo de riego son las variables que se deben calcular para poder llevar a cabo un buen uso del agua.

Conceptos de frecuencia y tiempos de riego.

CUÁNDO REGAR.

La frecuencia de riego permite establecer cada cuántos días se debe regar, procurando optimizar el uso del agua para maximizar la producción y calidad de los productos agrícolas. La frecuencia de riego depende de las características de la planta, del medioambiente, de las propiedades hidráulicas del suelo, del método de riego y de la capacidad de retención de agua del suelo. Por ejemplo en suelos arenosos la frecuencia de riego será menor, mientras que en suelos arcillosos la frecuencia de riego será mayor debido al comportamiento del agua en el suelo tal como se ve en la Figura 14.

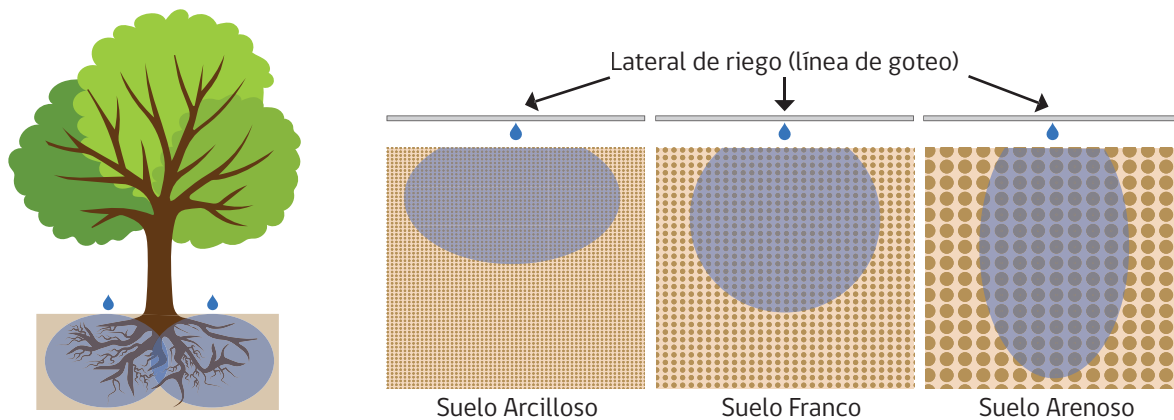


Figura 14. Bulbo húmedo en riego por goteo para diferentes texturas de suelo.

Por ejemplo, si el valor total de agua útil o aprovechable para la planta es de 40 mm en 60 cm de profundidad efectiva de raíces, implica que la planta puede llegar a disponer de 40 L de agua por m^2 de suelo a esa profundidad de raíces, que es equivalente a 400 m^3 de agua/ha a igual profundidad. Si consideramos una evapotranspiración de cultivo diaria de 4,0 mm, en teoría la capacidad del suelo se agotaría en 10 días. Sin embargo, en la práctica no se espera el agotamiento total del suelo para volver a regar sino que se considera una parte, con el fin de que el suelo disponga siempre de un contenido que no afecte significativamente el rendimiento del cultivo. A esta consideración se le llama criterio de riego, como se mencionó en el Capítulo 1 sección humedad aprovechable para la planta, por lo general se sugiere un valor de 50%.

En la Tabla 5 se muestra un ejemplo de frecuencias de riego para frutales en Linares considerando ETc = 5,0 mm en diferentes tipos de suelo.

Tabla 5. Frecuencias de riego para tres tipos de suelo calculadas en base a la ETo de Linares para frutales con riego por goteo. Se considera una profundidad de raíces de 60 cm y un suelo sin piedras.

Suelo	Frecuencia de riego (días)					
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Arenoso	4	2	2	2	2	3
Franco	8	5	3	4	5	7
Arcilloso	17	10	7	8	10	14

CUÁNTO REGAR.

El tiempo de riego permite establecer durante cuánto tiempo debo regar, procurando optimizar el uso del agua para maximizar la producción y la calidad de los productos agrícolas. En microriego (goteo, microaspersión o microjet) el tiempo de riego depende de las características de la planta, medio ambiente, propiedades hidráulicas del suelo, método de riego, capacidad de retención de agua del suelo y del caudal que se aplica a la planta (tasa de aplicación o precipitación del equipo de riego). Es importante considerar que el tiempo de riego es una estimación que depende del diseño del sistema de riego (cada equipo de riego tiene una capacidad de aplicación diferente que fue definida por quién diseñó el equipo, por lo que esta información es fundamental para conocer el tiempo de riego) y de la demanda de agua del cultivo por lo que siempre es recomendable tener información adicional in-situ para ir ajustando los tiempos y frecuencias de riego usando sensores de humedad de suelo o calicatas.

Para determinar el tiempo de riego se necesita conocer la cantidad de agua que consume el cultivo diariamente, el número de días entre cada riego (frecuencia de riego), la eficiencia de aplicación del sistema de riego localizado (85% en microaspersión y 90% en goteo y cinta), la tasa de aplicación del equipo y la distancia de plantación entre y sobre hilera.

Por ejemplo, si consideramos un diseño que contemple un lateral por hilera, con goteros de 3,0 L/h en suelos arcillosos, francos y arenosos, un volumen de suelo humedecido del 50%, un espaciamiento entre emisores de 0,4 m y una distancia de plantación entre hilera y sobre hilera de 3,0 m y 3,0 m, respectivamente, los tiempos de riego para una plantación de avellanos en Linares, región del Maule, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Tiempos de riego determinados para una plantación de avellanos con riego por goteo en Linares.

Suelo	Tiempo de riego (horas)					
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Arenoso	2,1	3,0	3,5	3,7	3,0	2,5
Franco	4,2	6,1	7,7	8,2	6,2	5,0
Arcilloso	5,7	8,9	9,5	9,8	9,0	6,5

Variación espacial de suelos

Variación de los suelos en el predio.

En Chile, debido a su extensión y particularidades geográficas, existe una gran cantidad de tipos de suelos, los que variarán en función de las propiedades químicas (por ejemplo, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio), hidrofísicas (contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, densidad aparente, textura), topografía, entre otros. Estas diferencias hacen importante poder identificarlas en cada predio y definir el tipo de proyecto en función de los recursos disponibles.

El manejo de agua con fines de riego agrícola depende en gran medida de la demanda del cultivo y de la cantidad de agua que puede almacenar un suelo. La variabilidad espacial del suelo influirá en la toma de decisiones, por ejemplo, al momento de llevar a cabo un proyecto agrícola: desde la proyección y manejo de cuarteles, diseño del sistema de riego, plan de fertilización y proyección de rendimientos. La Figura 15 muestra la variación espacial de un suelo tipo, se observa que en un área relativamente pequeña existe una gran variabilidad de suelos (cada color representa un tipo de suelo), que además variará en profundidad, afectando en el diseño y manejo de los proyectos de riego. Por lo tanto, debido a la variabilidad espacial de suelo es fundamental sectorizar los equipos de riego en base a los tipo de suelo.

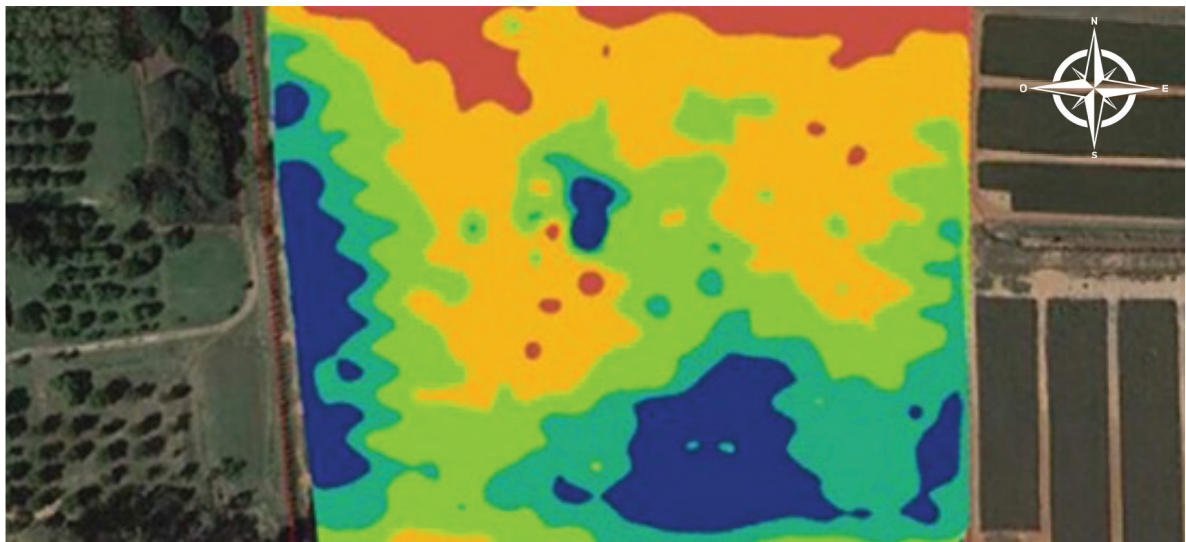


Figura 15. Variabilidad espacial del suelo dentro de un predio.

La heterogeneidad de los suelos no solo radica en su origen, también lo hace en su pendiente, exposición y uso. Esto tiene consecuencias a nivel biológico, químico y físico. En cuanto a sistemas de riego, las propiedades más importantes son las hidrofísicas, dentro de las cuales encontramos la humedad del suelo a capacidad de campo (CC), la humedad del suelo a punto de marchitez permanente (PMP), la densidad aparente y porosidad total. Estas características son muy importantes de determinar, ya que el diseño de los sistemas de riego dependerá de estas características y, por tanto, a futuro su manejo y programación.

El contenido de agua del suelo disponible para las plantas (contenido de agua entre CC y PMP), o humedad aprovechable es un factor clave que se debe determinar para poder programar el riego adecuadamente. Cuando existe una alta variabilidad de los tipos de suelo en un área a regar, es necesario sectorizar según esto ya que las consecuencias pueden ser sobre-regar zonas con suelos con baja retención o muy delgados o sub-regar zonas con alta retención y profundos. El impacto de la mala sectorización de los sistemas de riego producto de no considerar variabilidad espacial de suelos, puede tener consecuencias en el rendimiento del cultivo, ineficiencia en la aplicación de agua, pérdida de fertilizantes, contaminación por fertilizantes y gasto excesivo de energía. El contenido de agua del suelo disponible para las plantas (contenido de agua entre CC y PMP), o humedad aprovechable, es un factor clave que se debe determinar para poder programar el riego adecuadamente. Cuando existe una alta variabilidad de tipos de suelo en un terreno a regar, es necesario sectorizar según esto ya que las consecuencias pueden ser sobre-regar zonas con suelos con baja retención o muy delgados o sub-regar zonas con alta retención y profundos. El impacto de la mala sectorización de los sistemas de riego producto de no considerar las características hidrofísicas, puede tener consecuencias en el rendimiento del cultivo, ineficiencia en la aplicación de agua, pérdida de fertilizantes, contaminación por fertilizantes y gasto excesivo de energía.

Sectorización del sistema de riego.

La alta variabilidad de tipos suelos en un terreno a regar debe ser analizada tanto en profundidad, como espacialmente. La sectorización del suelo debe realizarse bajo criterios de flexibilidad ya que los límites de las unidades de suelo no tienen un patrón geométrico (Figura 16). Es por esto que el criterio debe tener una mezcla de parámetros técnicos y operativos (diseño de cuarteles, calles, posición de la caseta, etc.).

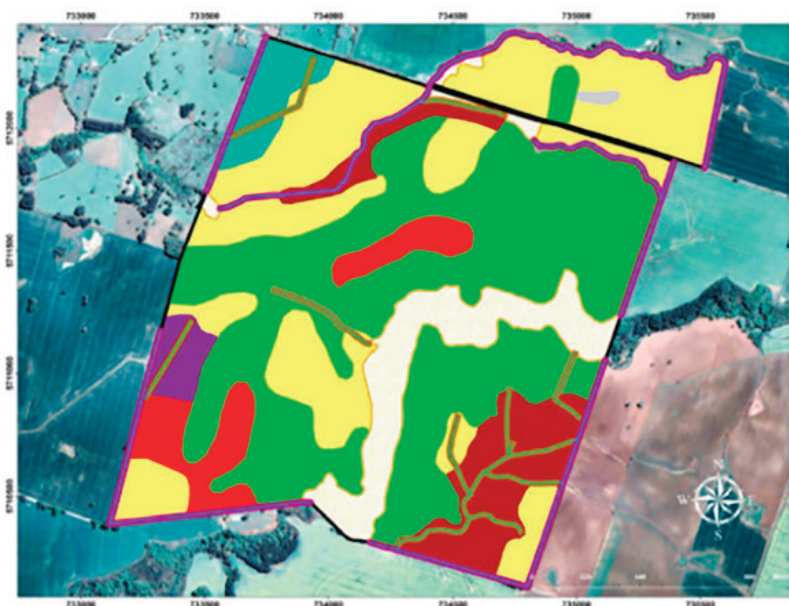


Figura 16. Sectorización de suelo para posterior uso en el diseño de un sistema de riego.

Una vez que se ha sectorizado el suelo de un predio en base a su variabilidad, su manejo será más homogéneo y eficiente, tanto en la aplicación de agua como fertilizantes. La sectorización se puede realizar en base a calicatas con extracción de muestras para el análisis en el laboratorio (CC, PMP y Da) y además con una grilla de puntos en el campo se puede chequear diferencias in-situ utilizando un barreno como se muestra en la Figura 17. Hoy en día existen otras alternativas para realizar mapeos de suelos como el uso de imágenes satelitales o mapeo in-situ.



Figura 17. Toma de muestra con barreno (A) y análisis cualitativo de la variación de la textura (B).

Por ejemplo, para un suelo de Ovalle, con un cultivo de cítricos, el tiempo de riego varía desde 3 a 5 h en suelos arcillosos y 2 a 4 h en suelos francos arcillosos, lo que implica que si no se considera la variabilidad del suelo en la programación de riego se aplicarán horas extras de riego. Los tiempos de riego mencionados anteriormente son teóricos y propios de cada sistema de riego, por lo que no se recomiendan usar como referencia. Recordemos que las condiciones de caudal, número de líneas de riego y emisores y marco de plantación son propias de cada sistema.

Eficiencia de aplicación y uniformidad del riego

Cuando se aplica un riego se trata de aportar el agua necesaria para un correcto desarrollo del cultivo. El agua aplicada durante el riego debe cumplir, entre otros, los siguientes requisitos: suministrar a la planta el agua requerida; estar distribuida uniformemente sobre el área de riego; no exceder la capacidad de almacenamiento de agua del perfil del suelo explorado por el sistema radical para impedir la filtración profunda y la contaminación de los acuíferos; minimizar la erosión, la escorrentía superficial y el deterioro de la estructura de suelo.

Eficiencia de aplicación.

La eficiencia de aplicación del agua en sistemas de riego (EA) se define como la razón entre el volumen de agua retenido en la zona de raíces después de un evento de riego y el volumen total de agua aplicado en el evento de riego. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de la definición de EA.

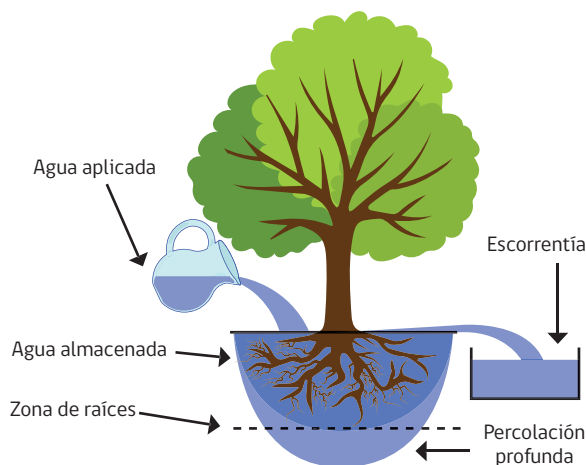


Figura 18. Eficiencia de aplicación.

Cada sistema de riego tiene asociado una EA teórica. Por ejemplo un sistema de riego por goteo tiene una EA teórica de un 90%. Sin embargo este valor puede diferir de la realidad llegando incluso a valores de EA de un sistema de riego superficial (40%). Esto dependerá del manejo del sistema de riego, por lo que se recomienda aplicar la cantidad de agua que demanda el cultivo relacionado a la cantidad de agua que es capaz de retener el suelo. En la Tabla 7 se muestran valores de EA teóricos y medidos en sistemas de riego localizado.

Tabla 7. Eficiencia de aplicación teórica y medida en un sistema de riego localizado.

Sistema de riego	EA teórica (%)	EA medida (%)
Goteo	90	50 - 90
Goteo subterráneo	95	-
Microaspersión	85	40 - 85
Microjet	85	40 - 85

Uniformidad del riego.

La uniformidad es un concepto que permite conocer si las diferentes partes de un sector de riego reciben una cantidad de agua similar (Figura 19).

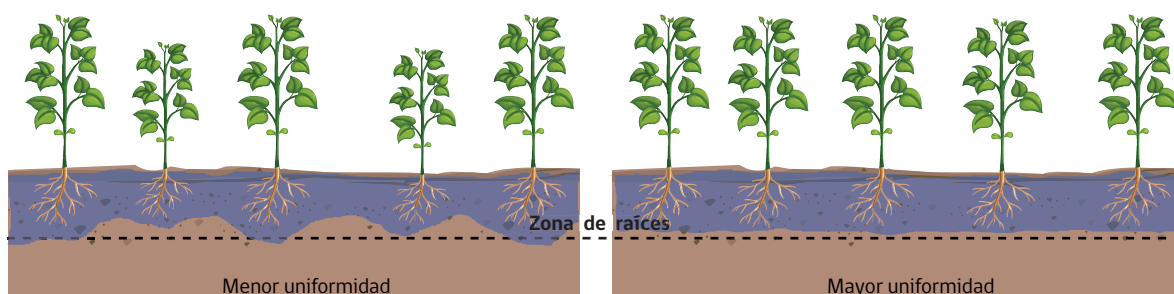


Figura 19. Uniformidad de riego.

La uniformidad del riego en sistemas de riego presurizados se ve afectada por la diferencia de presiones en los diferentes puntos de un sector de riego provocada por la pendiente del terreno, tuberías de alimentación de pequeño diámetro que producen elevadas pérdidas de carga, largas longitudes de los laterales y problemas con las válvulas o los reguladores de presión.

El conocimiento de la uniformidad del riego a lo largo de la temporada de riego puede ayudar a alcanzar el objetivo de cubrir las necesidades de agua del cultivo sin afectar su producción y, al mismo tiempo, minimizar las pérdidas de agua y fertilizantes aportados por el sistema de riego.

La uniformidad de un sistema de riego se suele medir por el coeficiente de uniformidad (CU). Se entiende que si todos los puntos de la parcela reciben la misma cantidad de agua el CU es igual a 100%.

Evaluación de la uniformidad del riego.

Para realizar una evaluación de uniformidad se requiere contar con vasos receptores de caudal (colector), probeta, cronómetro y hoja de registro (Figura 20). Luego, se debe seleccionar una subunidad o subsector representativo de todo el sistema de riego según topografía, tipo de suelo, condición de las plantas, etc. Un subsector corresponde a aquella unidad cuyas líneas laterales o emisores son abastecidos por la misma tubería terciaria o múltiple, con regulación de válvula manual o eléctrica.



Figura 20. Materiales para evaluación de coeficiente de uniformidad.

En este subsector se debe elegir un número determinado de emisores, distribuidos uniformemente dentro de la subunidad o subsector de riego, según se indica en la Figura 21.

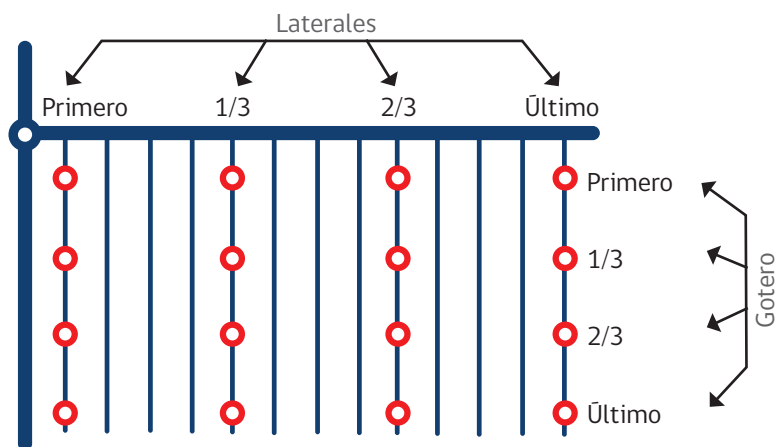


Figura 21. Esquema de una subunidad en un sistema de riego.

Se recomienda seleccionar 16 emisores para calcular el Coeficiente de Uniformidad. Para ello, se elige el lateral más cercano y el más lejano del inicio de la subunidad. Entre ambos laterales se eligen otras 2 laterales intermedias, ubicadas a $1/3$ y a $2/3$ de la longitud de la terciaria. En cada lateral se seleccionan 4 emisores, siguiendo el mismo criterio; es decir, el más cercano y el más lejano del inicio de cada lateral y dos emisores intermedios.

El caudal (Q), es el volumen de agua que entra en la probeta bajo un emisor (Figura 22) por un tiempo determinado.



Figura 22. Medición de caudal en un emisor (gotero). Inicio del aforo (A) y término del aforo (B).

Por ejemplo, si se considera un tiempo de medición de 60 segundos y el volumen capturado (V) es de 34 mL, el caudal del emisor es de 2,0 L/h. A continuación se muestra el caudal obtenido considerando un tiempo de medición de 60 segundos (Tabla 8).

Tabla 8. Caudal medido considerando un tiempo de medición de 60 segundos. V es el volumen recolectado en el tiempo de medición.

V (mL)	Q (L/h)	V (mL)	Q (L/h)
5	0,3	40	2,4
8	0,5	50	3,0
10	0,6	60	3,6
20	1,2	70	4,2
30	1,8	100	6,0
34	2,0	134	8,0

Determinación de la uniformidad del cuarto menor.

Para la cuantificación de la uniformidad del cuarto menor (CU25%) se debe seguir el procedimiento de evaluación de uniformidad detallado en la sección anterior. Por ejemplo, si un agricultor ha medido los caudales en una subunidad de riego localizado (Tabla 9). Con estos datos quiere determinar la uniformidad que tiene en su subunidad.

Tabla 9. Planilla de registro de datos de campo para caudales (en rojo caudales menores).

Posición del lateral	Q primer emisor (L/h)	Q emisor 1/3 (L/h)	Q emisor 2/3 (L/h)	Q ultimo emisor (L/h)
Inicial	4,2	4,1	4,0	4,1
1/3	4,0	3,7	4,1	4,0
2/3	3,8	3,9	3,9	3,9
Último	4,1	4,0	3,8	4,0

Con los datos de caudal (Q) expresados en L/h se calculará la uniformidad del cuarto menor de los caudales de la siguiente manera:

- Identificar los 4 datos de menor caudal marcados en rojo en la (Tabla 9).
- Calcular el promedio de los 4 emisores de menor caudal.

$$q_{25\%} = \frac{q_1+q_2+q_3+q_4}{4} = \frac{3,7+3,8+3,8+3,9}{4} = 3,8 \text{ L/h}$$

- Calcular el promedio de todos los emisores.

$$q_a = \frac{4,3+4,0+3,8+4,1+4,1+3,7+3,9+4,0+4,0+4,1+3,9+3,8+4,1+4,0+3,9+4,0}{16} = 3,98 \text{ L/h}$$

- Dividir el resultado del punto b por el punto c (para el ejemplo 3,8 y 3,98 L/h, respectivamente) y multiplicar por 100, según la siguiente ecuación:

$$CU_{25\%} = \frac{3,8}{3,98} \times 100 = 95,5\%$$

Finalmente, se debe comparar el valor obtenido con los rangos expresados en la Tabla 10 y determinar el funcionamiento del sistema. Para el caso del ejemplo, la subunidad evaluada posee un funcionamiento excelente, pues la uniformidad es mayor al 90%.

Tabla 10. Valores de uniformidad del cuarto menor.

Funcionamiento	Uniformidad del cuarto menor (%)
Excelente	90-100
Buena	80-90
Aceptable	70-80
Inaceptable	<70

Control de riego

En las instalaciones de riego existen una serie de elementos que permiten manejar y realizar el riego de forma adecuada. Básicamente se trata de elementos de medida, de control y de protección (Figura 23).

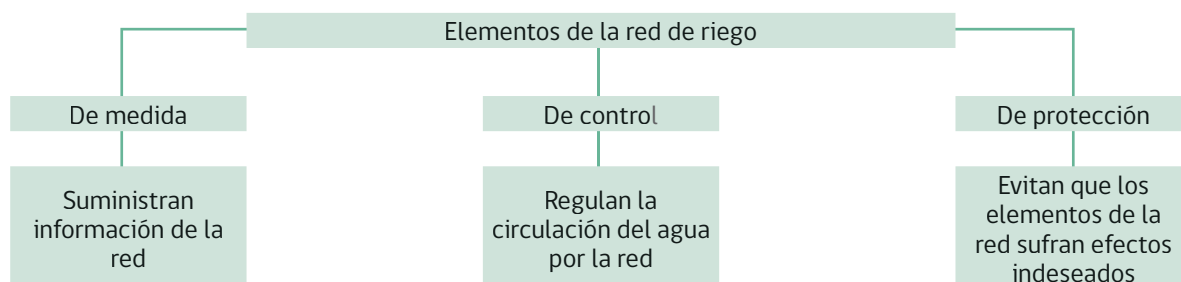


Figura 23. Elementos de la red de riego.

Elementos de medida.

Los más comunes suelen destinarse para medir el caudal o el volumen de agua que pasa por un determinado punto de la tubería o bien la presión en cualquier punto del sistema. Es fundamental contar con este tipo de medidores en las instalaciones de riego localizado.

Los medidores de volumen son elementos utilizados para medir la cantidad de agua que pasa en un tiempo determinado. También son útiles para descubrir la existencia de obturaciones, roturas o fugas de agua en determinados lugares de la instalación. Además, los medidores de volumen, normalmente llamados contadores, permitirán realizar un riego controlado ya que se podrá saber la cantidad de agua que se ha aplicado independientemente del tiempo que se esté regando. Los medidores de caudal o volumen más usados son los de turbina y los rotámetros.



Contador volumétrico

Los elementos que miden presión se denominan manómetros, que son de funcionamiento mecánico. Cuando el manómetro marca cero, no existe presión dentro de la tubería.

Es necesario utilizar manómetros para tener un control visual directo de las condiciones de operación del sistema de riego. Los manómetros deben utilizarse en el cabezal de control (salida de la bomba, antes y después de filtros y equipo de fertirrigación), en puntos estratégicos de la red de conducción, en las unidades de control autónomo y en las terminales de las tuberías críticas.



Manómetro
1 bar = 125 kPa = 14,7 PSI

Elementos de control.

Con ellos se regula tanto el caudal que pasa por un punto determinado de la tubería como la presión de agua; en ambos casos se habla de reguladores. Además, existe la posibilidad de controlar el paso de agua por una tubería con elementos denominados válvulas. Las válvulas, permiten controlar el paso de agua en una tubería, abriendo, cerrando o dejando un paso intermedio de agua.

	El elemento de cierre es una compuerta vertical que se desplaza hacia arriba o abajo moviendo un volante. Suelen ser muy útiles para aislar determinadas zonas de la instalación ya que son estancas y provocan pocas pérdidas de carga cuando están totalmente abiertas, pero no sirven para regular finamente el caudal. Suelen fabricarse con diámetros entre 1/2 pulgada y 2 metros.		También son llamadas de esfera, interponen a la corriente una bola en la que se ha taladrado un cilindro. Si el cilindro que hace de orificio está en la dirección del paso de agua, la apertura es total. Suelen utilizarse para aperturas o cierres totales, no para regulación y en general se usan en conducciones de pequeño diámetro, no mayores de 3 pulgadas.
	Consisten también en una válvula hidráulica a la que se incorpora un dispositivo electromagnético que acciona el mecanismo que produce la señal hidráulica para cerrarla. Son imprescindibles cuando se dota a la instalación de automatización, en cuyo caso la señal que acciona la electroválvula se envía desde los elementos que programan el riego en forma de impulsos eléctricos.		Los reguladores de presión se utilizan para regular y controlar la presión a partir del punto de la red de riego en que se instalen y además, para evitar las sobrepresiones que puedan producirse en algún punto de la instalación y provocar tanto roturas de tuberías como de emisores. La regulación se realiza a demanda del usuario, que seleccionará la presión dentro de unos límites, normalmente entre 0,2 y 8 bar.
	Estas válvulas impiden que el agua circule en sentido contrario al deseado. Comúnmente se utilizan para evitar golpe de ariete		Al igual que las válvulas chapaleta, estas válvulas impiden que el agua circule en sentido contrario al deseado, pero se utilizan comúnmente en la succión de una bomba para evitar su descebado.



Válvula de mariposa

Esta válvula utiliza un disco giratorio para controlar el flujo en un sistema de riego. Son conocidas como válvulas de cuarto de vuelta puesto que su funcionamiento requiere una rotación de 90° entre la posición abierta y la cerrada. Sirven para habilitar o restringir el paso del agua hacia una tubería unida por bridas. El principal motivo de uso es para el mantenimiento de los filtros y tuberías aguas abajo del sistema de riego, bloqueando el paso de agua y manteniendo la red en carga mientras se hace la limpieza periódica de las tuberías y accesorios adicionales. Su principal ubicación es en los cabezales de riego o casetas.

Elementos de protección.

Están destinados a proteger los elementos de la instalación de sobrepresiones o de depresiones, generalmente producidas cuando el sistema de riego entra en funcionamiento o cuando se está parando. Esto coincide con la apertura y cierre de válvulas, puesta en marcha y parada de bombas, etc.

Las válvulas de alivio son esenciales en un sistema de riego localizado cuando existen riesgos que la presión aumente a niveles peligrosos en condiciones de funcionamiento anormales. Cuando esto ocurre, la presión aumenta lo suficiente para abrir la válvula de alivio, ésta reduce la presión aguas abajo hasta un nivel establecido y protege los componentes aguas abajo de los aumentos de presión. La válvula de alivio de presión puede ser instalada después de la fuente agua, antes de una subunidad de riego y/o puntos bajos.

Las válvulas de aire (ventosas), son dispositivos que se instalan en las conducciones de agua para introducir o evacuar el aire. Si no se dispusieran válvulas de aire, se producirían sobrepresiones en las tuberías durante el llenado y depresiones durante el vaciado, lo que podría ocasionar su rotura. Los tipos de válvulas de aire son de simple efecto, doble efecto o triple efecto. La válvula de aire de simple efecto permite la fuga de aire al encender el sistema de riego. La válvula de aire de doble efecto permite la fuga de aire al encender el sistema de riego y el reingreso de aire al apagar el sistema. La válvula de aire de triple efecto permite la fuga de aire al encender el sistema de riego, el reingreso de aire al apagar el sistema o la expulsión constante del burbujeo. En general deben instalarse en los siguientes lugares dentro de una instalación de riego localizado:

- ✓ Puntos altos de la instalación.
- ✓ Tramos largos con pendiente uniforme.
- ✓ Cambios de pendiente en las conducciones.
- ✓ Salida del cabezal de riego.

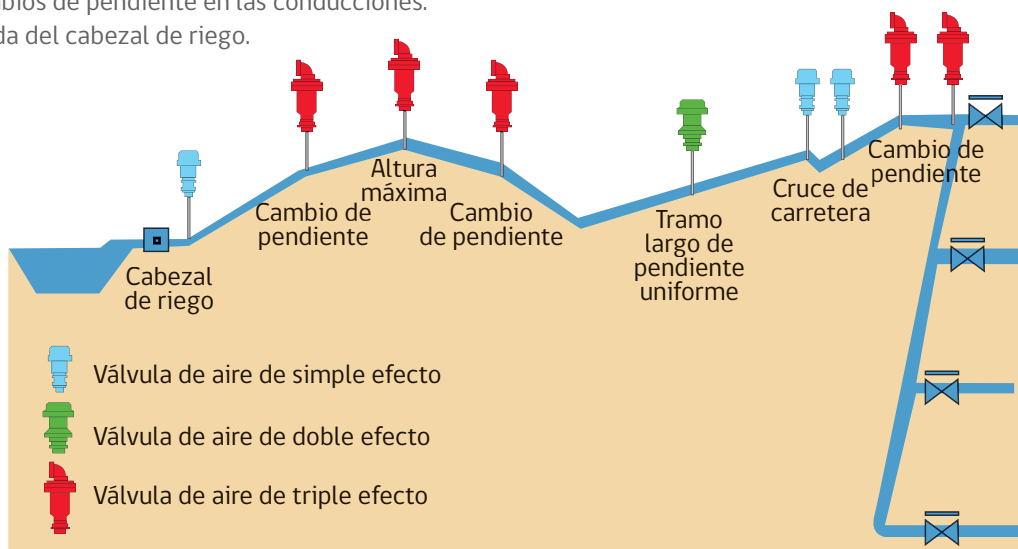


Figura 24. Disposición de los elementos de protección en la zona de impulsión de un sistema de riego.

Automatización de sistemas de riego

Estrategias básicas de control.

La automatización en los sistemas de riego presurizado está compuesta por diferentes componentes que permiten al usuario realizar un evento de riego de forma automática sin la necesidad de realizar una acción de comando en la caseta o cabezal de riego.

Existen diferentes tecnologías de automatización de sistemas de riego que permiten programar un evento de riego de manera presencial, así como sistemas que nos permiten ejecutar planes de riego por medio de sistemas con comunicación inalámbrica a distancia e incluso por medio de internet, facilitando la tarea de regar. Por ejemplo, utilizando un programador de riego el agricultor puede configurar el tiempo y la frecuencia de riego de los sectores automatizados. Este programador se localiza, normalmente, en la caseta de riego donde puede configurarse o bien conectarse a internet para programarlo de forma remota mediante una plataforma web. El tiempo y la frecuencia de riego ingresada al programador deben estar alineadas de acuerdo a la capacidad de retención de agua del suelo, la demanda de agua del cultivo y el sistema de riego. Finalmente, para poder utilizar el sistema de riego automático es necesario realizar inspecciones periódicas de los componentes (tablero eléctrico, equipo de bombeo, filtros, electroválvulas, programador, etc.) para validar su correcto funcionamiento y asegurar la buena ejecución de los riegos.

Componentes del sistema de automatización.

Los principales componentes de un sistema de riego automático son (Figura 25):

1. **Programador de riego:** Es un equipo electrónico capaz de enviar una señal eléctrica para encender y/o apagar electroválvulas y/o equipos de bombeo.
2. **Electroválvulas:** Son válvulas eléctricas que permiten que el agua ingrese o no ingrese al sector de riego. Estas pueden ser controladas por el programador de riego.
3. **Filtro:** Es un componente que permite limpiar (filtrar) el agua que se impulsa en la matriz de riego para evitar que los emisores (goteros, microaspersores o microjet) se tapen. Comúnmente en sistemas de riego se puede encontrar filtros de anilla, malla o arena.
4. **Equipo de bombeo:** Es una bomba hidráulica acoplada a un motor eléctrico que permite captar el agua desde una fuente (normalmente una piscina o tranque acumulador) e impulsarla a los sectores de riego.



Figura 25. Componentes principales de automatización en un sistema de riego: Programador de riego (A), electroválvula (B), filtro de arena (C) y equipo de bombeo (D).

Validación del buen funcionamiento de los componentes.

Para validar el buen funcionamiento del sistema de riego automatizado se debe realizar una supervisión periódica de los componentes, usualmente una vez cada 1 o 2 semanas (supervisión mínima de a lo menos una vez por temporada).

1. **Validación del programador de riego:** El programador de riego incorpora normalmente una pantalla para interactuar con el usuario, indicando en qué estado se encuentra (Figura 26). Antes de iniciar se debe validar que el programador se encuentre energizado (conectado a la corriente eléctrica de 220 V) y que además cuente con la batería de respaldo cuya función es mantener la programación en caso de fallo de la fuente energética principal (220 V). La pantalla muestra información respecto a la fecha y hora actual, además de los riegos en ejecución. Un problema típico del programador es que se encuentre sin batería o desenergizado, si esto ocurre debe contactar al eléctrico o persona habilitada para revisar el equipo.



Figura 26. Ejemplos de programadores de riego. Miracle plus (A), Nelson EZ PROjr 8300 series (B), Galcon G.S.I 24AC (C).

2. **Validación del funcionamiento del equipo de bombeo y electroválvulas:** Antes de encender el equipo de bombeo se debe validar que el tablero de riego se encuentre con el "switch" en posición "automático" lo que permitirá que la bomba de riego se encienda por medio del programador (Figura 27A). Además, se debe supervisar cada electroválvula del sector de riego para verificar que el solenoide está funcionando correctamente. Por su parte, una manera de verificar el correcto funcionamiento hidráulico de la electroválvula es activándola manualmente (Figura 27B).

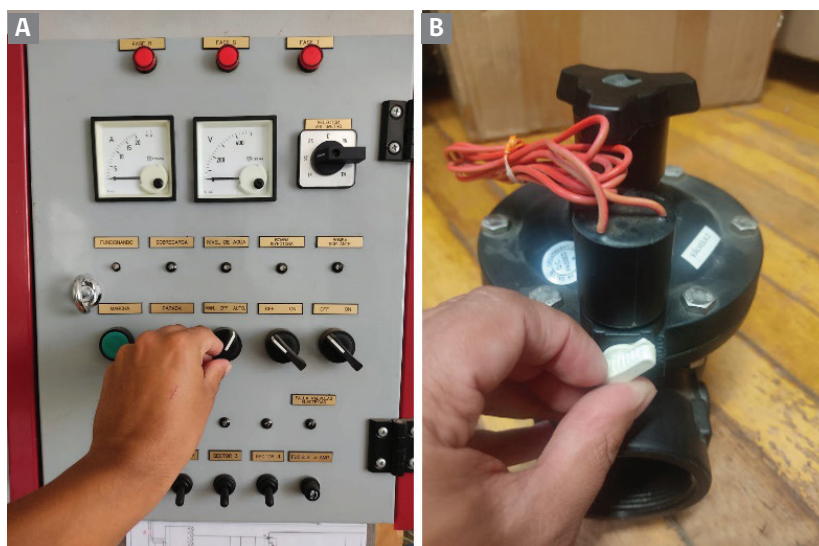


Figura 27. Tablero de riego switch automático (A) y switch de estado automático-manual de electroválvula (B).

- 3. Validación del encendido del equipo de bombeo y electroválvulas:** Se debe realizar una prueba considerando un riego de 5 minutos por cada sector configurado, esto ayudará a verificar que tanto el equipo de bombeo y las electroválvulas se encuentra operando correctamente. Para validar esto se visitará cada sector de riego y se observará que solo el sector de riego programado es el que está en funcionamiento. En caso de no abrir una electroválvula se recomienda revisar el estado de esta, es decir si el solenoide posee alguna suciedad o se encuentra desconectado, entre otras. En caso de no encontrar la causa del problema, debe contactar a un eléctrico para que valide el estado de los cables, solenoide y/o el correcto funcionamiento del programador.

Programación de riego.

Para programar un evento de riego primero se debe conocer el tiempo y la frecuencia de riego (Capítulo 2, sección frecuencia y tiempos de riego) considerando el tipo de suelo, el sistema de riego y la demanda de agua del cultivo. Dependiendo de la marca del programador de riego variarán los pasos para ingresar los parámetros al programador. Por lo general se debe ingresar por cada sector de riego: la hora de inicio del evento de riego, así como la duración del riego (tiempo de riego) y el o los días que se realizará el evento de riego (frecuencia de riego). Normalmente esto se ingresa en días de la semana, por ejemplo, si la frecuencia de riego calculada fue de 2 días y comenzamos el día lunes, en el programador debemos seleccionar el día lunes, miércoles, viernes y domingo. Para mayor detalle se debe guiar por el manual de usuario del programador.

Validación de la ejecución del riego.

Para validar que un evento de riego fue ejecutado de forma exitosa se debe realizar un monitoreo continuo de la humedad del suelo y el estado hídrico del cultivo. Para ello existen diferentes métodos, por ejemplo, para monitoreo de la humedad del suelo se sugiere tener instalado sensores de humedad, realizar calicatas o bien inspeccionar con barrenos para supervisar que el evento de riego programado cumplió el objetivo deseado. Hoy en día, además, existen alternativas de monitoreo satelital y/o usando sensores multiespectrales montados en un dron para conocer el estado hídrico de los cultivos que complementan la información recogida en el campo.



CAPÍTULO 3

Sensores de clima, humedad de suelo y planta. Instalación y telemetría.

Programa

Transferencia tecnológica en programación
y control de riego tecnificado.

Sensores de variables agroclimáticas

Existen diferentes tipos de sensores que se pueden instalar en un predio para el monitoreo del cultivo. Específicamente para determinar la demanda de agua de un cultivo/frutal se debe utilizar la evapotranspiración de referencia (ET_o). En esta sección se muestran los sensores de clima para el monitoreo de las variables agroclimáticas de interés para determinar la ET_o a través de parámetros como la radiación solar, velocidad de viento, temperatura y humedad relativa del aire.

Identificación de sensores agroclimáticos.

El dispositivo que mide de manera conjunta las variables agroclimáticas que influyen en la determinación de la ET_o se le conoce como "Estación meteorológica automática (EMA)". La EMA está compuesta por 5 sensores:

- ✓ Termómetro (temperatura del aire).
- ✓ Higrómetro (humedad relativa del aire).
- ✓ Anemómetro y veleta (velocidad y dirección del viento).
- ✓ Piranómetro (radiación solar).
- ✓ Pluviómetro (precipitación).

Instalación de una estación agrometeorológica.

La EMA debe estar instalada estratégicamente en el predio para lograr representar de manera óptima las condiciones climáticas del campo. Para esto, se debe seleccionar un lugar despejado con una distancia horizontal de al menos 10 veces la altura de obstrucción (en el caso de la Figura 28, la altura del árbol). Por lo general, se recomienda una distancia despejada en la dirección de los vientos predominantes del predio de a lo menos 50 m. Es importante considerar que la EMA debe estar alejada de edificaciones y procurar que esté a pleno sol entre las 07:00 y 20:00 h en primavera-verano. El lugar seleccionado debe poseer pasto bien mantenido (corto y bien regado). En la Figura 28 se muestra un esquema representativo de la instalación de una EMA.

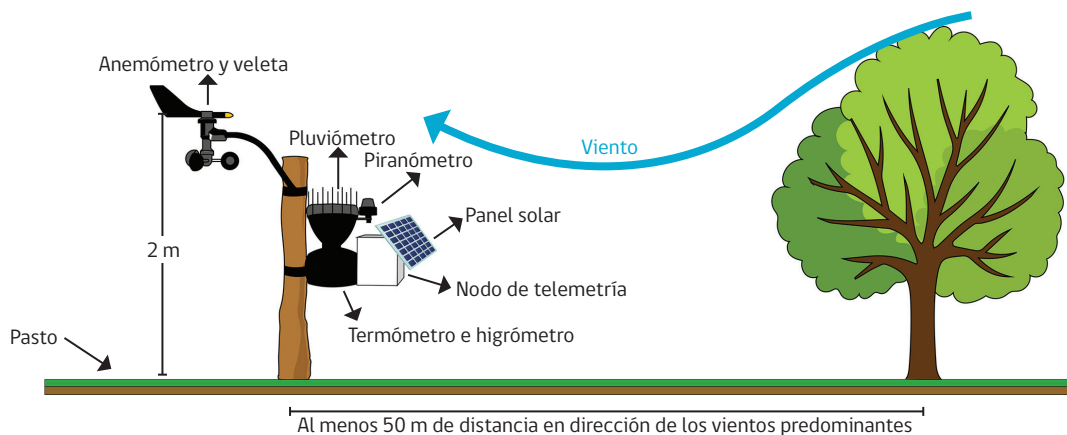


Figura 28. Diagrama de instalación de una estación agrometeorológica.

Normalmente para la instalación de la EMA se utiliza un mástil metálico o un polín de madera como soporte para los sensores (Figura 29). El mástil debe ser instalado en 90° con respecto a la superficie procurando que quede bien nivelado, esto ayudará a instalar fácilmente los sensores. Por otra parte, es recomendable que la estación sea protegida por un enrejado procurando de no sombrear o interferir los sensores.

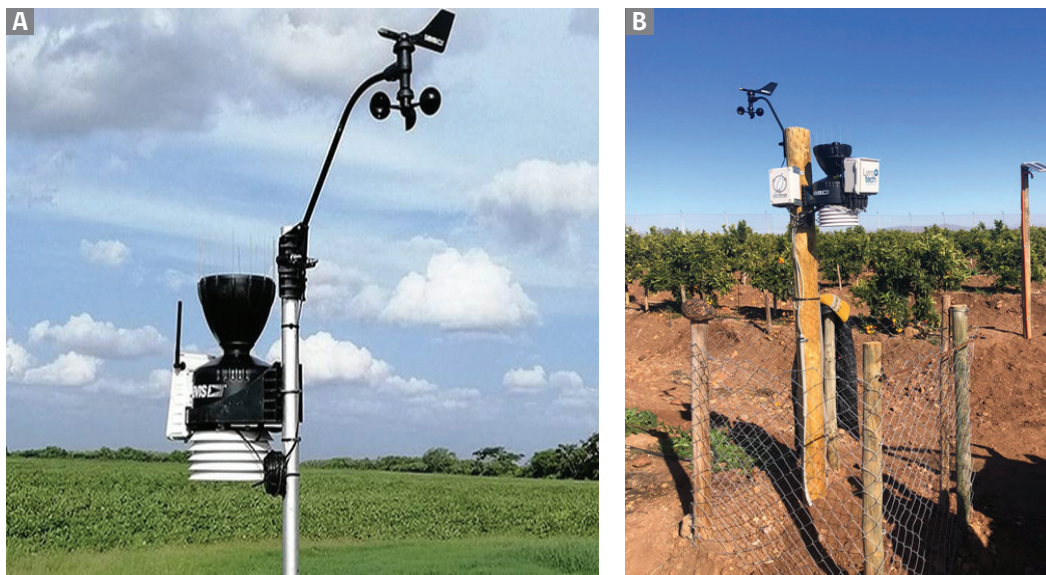


Figura 29. Ejemplo de soporte para instalación de EMA. Mástil de soporte (A), polín de madera (B).

Sensores instalados en una estación agrometeorológica.

El termómetro, higrómetro, anemómetro y veleta, piranómetro y pluviómetro instalados en una EMA necesitan de energía eléctrica para su funcionamiento. La energía eléctrica la entrega una batería que es recargada por energía fotovoltaica mediante un panel solar (Figura 30B). El panel solar debe ser instalado en una zona libre de sombra, es decir que no sea cubierto por algún elemento asociado a la estación o del área circundante (como por ejemplo árboles o reja de protección). Similar consideración se debe tener para el piranómetro, que no debe estar expuesto a la sombra durante las horas luz (Figura 30A), pues una errónea medición de la radiación solar entregará datos erróneos respecto a la estimación de la demanda de agua del cultivo.

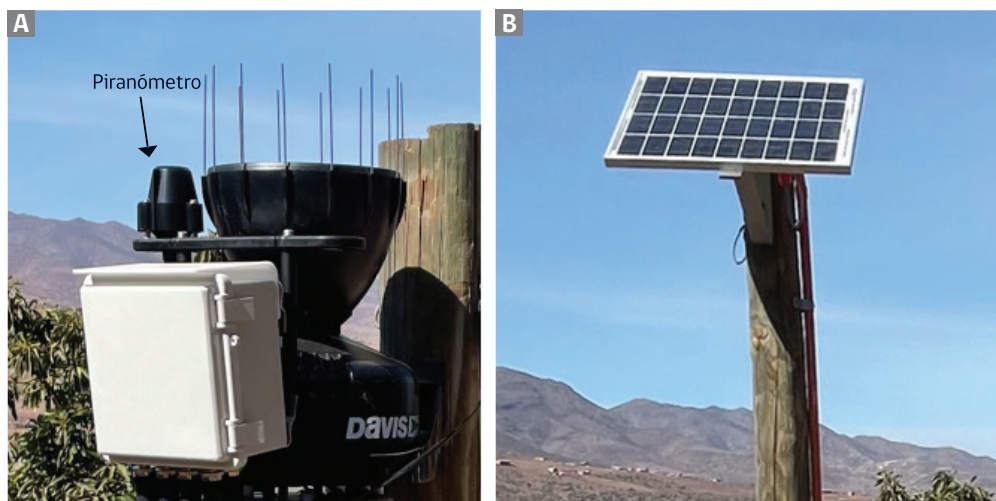


Figura 30. Piranómetro (A) y panel solar (B) utilizado en una EMA.

Para medir la velocidad y dirección de viento se utiliza un anemómetro y una veleta, respectivamente. La mayoría de las estaciones incorpora un brazo de soporte (Figura 31), el cual de acuerdo con la recomendación del fabricante debe ir orientado al norte al igual que la punta de la veleta, en su configuración inicial en este punto la mayoría de las EMA están configuradas con "0" grados. Sin embargo, considerando que estamos en el hemisferio sur y al instalar todo el instrumental en un solo mástil, esta configuración provoca que el soporte genere una sombra sobre el piranómetro por lo que se recomiendan dos alternativas: 1) que el brazo de soporte apunte hacia el sur, modificando manualmente en la configuración del software de la estación la referencia norte; 2) instalar el anemómetro y veleta en otro mástil.



Figura 31. Anemómetro (A) y veleta (B).

La temperatura y humedad relativa del aire es medida por un termómetro e higrómetro respectivamente (Figura 32). Este sensor es uno de los sensores más sensibles de una EMA por lo que se debe tener un cuidado especial, manteniéndolo siempre dentro del domo y limpio (Figura 32A).

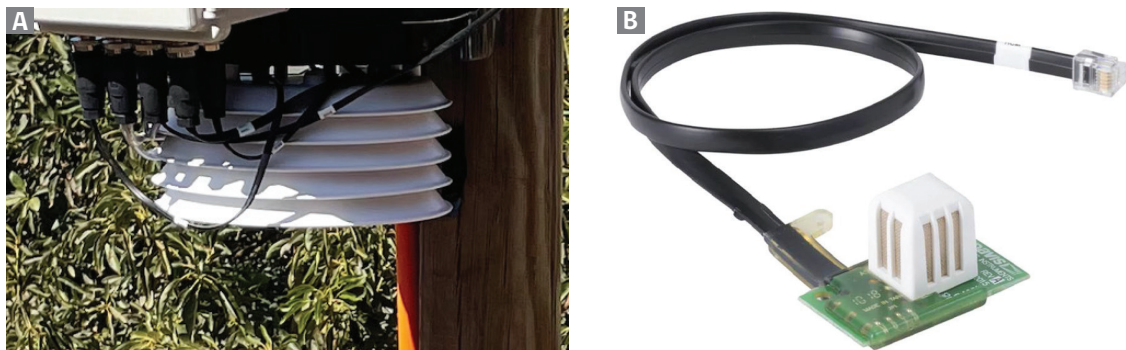


Figura 32. Domo contenedor de termómetro e higrómetro (A) y sensor de temperatura e higrómetro (B).

Normalmente, una EMA posee un pluviómetro, sensor encargado de medir la precipitación o lluvia (Figura 33). En su interior posee un balancín, quien es el encargado de recepcionar el agua capturada por el pluviómetro. Cada vez que el balancín completa su volumen se inclina al lado opuesto y cada volcado representan 0,2 mm de lluvia. Si bien este sensor es menos frágil que el de temperatura y humedad relativa, es necesario realizar limpiezas periódicas. Se debe evitar telas de arañas, hojas y desechos de aves, esto ayudará a tener registros más precisos de la precipitación. Además, se debe verificar que las varillas destinadas a disuadir la presencia de aves estén instaladas.

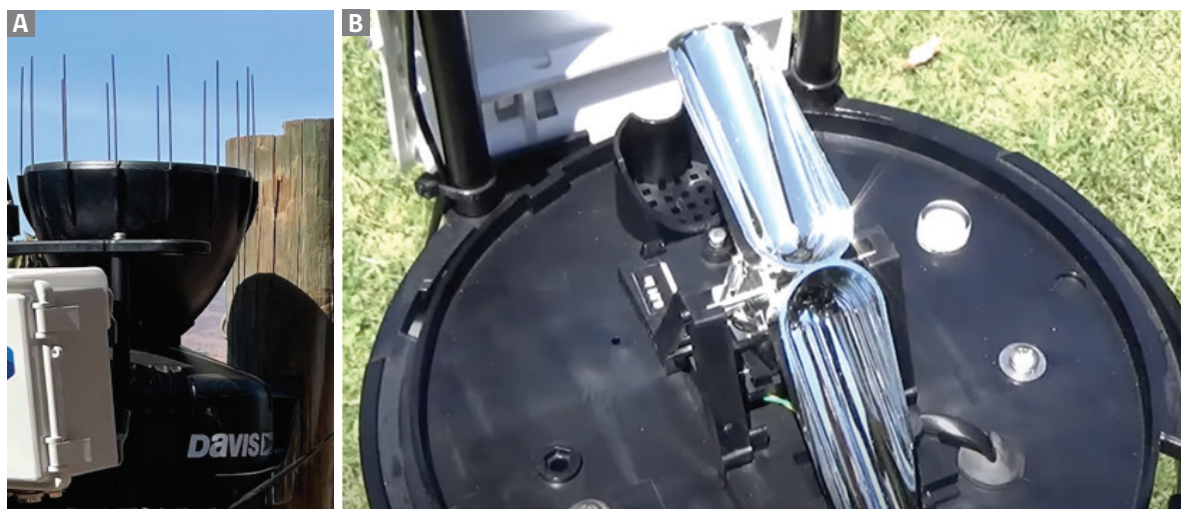


Figura 33. Pluviómetro (A) y balancín interior (B).

Los datos registrados por la EMA pueden ser visualizados, dependiendo del equipamiento, de manera local (pantalla visualizadora de los datos, Figura 34A) o en un sitio web (es necesario tener una interfaz de usuario para la visualización, normalmente se contrata como un plan de datos, Figura 34B). En caso de tener una estación meteorológica local, por lo general esta cuenta con una pantalla que mostrará los datos registrados (Figura 34A). Es recomendable verificar que el dispositivo pueda almacenar los datos para descargarlos periódicamente de forma local.

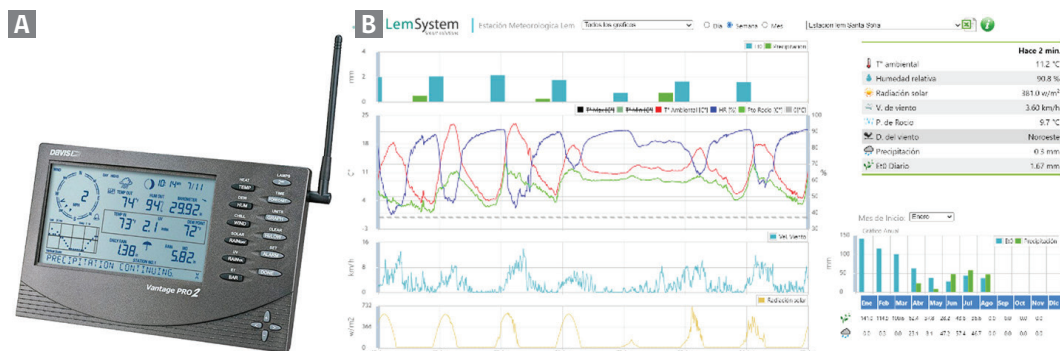


Figura 34. Ejemplo de visualización de los datos registrados por una estación meteorológica local (A) y una EMA en una interfaz web (B).

En general para poder determinar la cantidad de agua que hay que reponer con el riego se requiere conocer los milímetros de agua (mm) que el cultivo está utilizando. Una EMA permite a través de las mediciones de temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento estimar la evapotranspiración de referencia que en conjunto con el coeficiente de cultivo permite determinar la evapotranspiración de cultivo. Esta evapotranspiración es la cantidad de agua que el cultivo o huerto está utilizando, normalmente se expresa en mm/día, mm/semana o mm/mes. Para mayores detalles de la evapotranspiración se sugiere revisar Capítulo 1.

Sensores para medir la humedad del suelo

Los sensores de humedad de suelo son herramientas imprescindibles en el monitoreo y manejo del riego, ya que permiten conocer información precisa sobre la humedad presente en el suelo. Esto ayuda a determinar el momento adecuado para el riego, evitando el riego excesivo o insuficiente. Al conocer el nivel de humedad del suelo, se puede optimizar el uso del agua y garantizar un riego eficiente, lo que puede resultar en un ahorro significativo de agua y energía.

La humedad del suelo es un factor importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Un suelo bien humedecido proporciona las condiciones óptimas para la absorción de nutrientes y el funcionamiento adecuado de las raíces. Con los sensores de humedad del suelo, se puede monitorear y mantener el nivel de humedad adecuado, lo que ayuda a garantizar una buena salud de las plantas y un rendimiento óptimo.

El suelo puede variar tanto temporal como espacialmente (ver Capítulo 2, sección variación espacial de suelos) por lo que se deben conocer sus características de retención de agua, con el objetivo de manejar correctamente los sectores de riego y obtener adecuados resultados dentro de la producción agrícola. La estimación del contenido de agua en el suelo se puede realizar mediante diferentes métodos, desde una estimación a través del tacto (Figura 35A) hasta el uso de tensiómetros o sensores electrónicos especializados (Watermark®) que miden distintas variables del suelo en función de su principio de funcionamiento (Figura 35B y C).

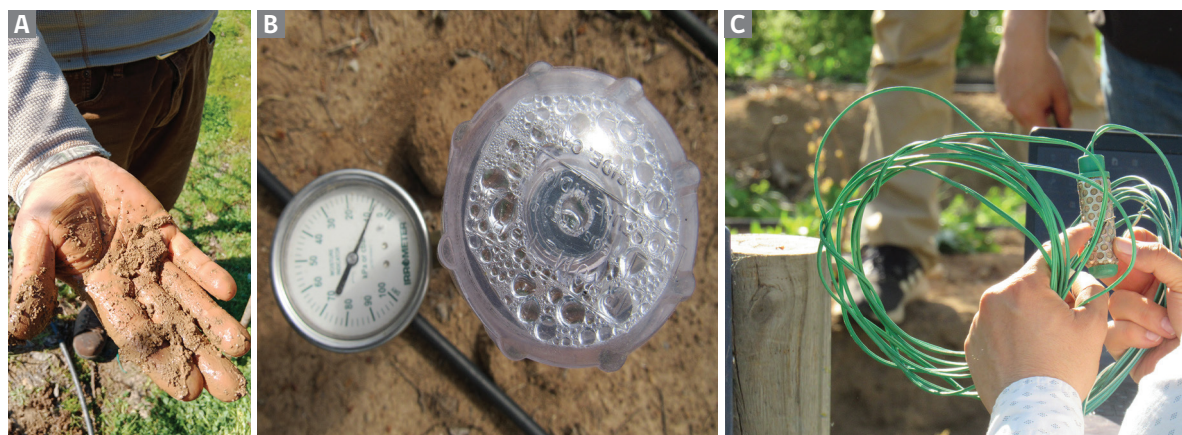


Figura 35. Estimación de la humedad al tacto (A), tensiómetro análogo (B) y tensiómetro digital “Watermark®” (C).

Algunas consideraciones transversales en la instalación de sensores de humedad de suelo son:

- ✓ Se debe elegir cuidadosamente el o los lugares donde instalar los sensores de humedad del suelo, ya que estos deben ser representativos de las condiciones generales del terreno y del cultivo. Las características de las plantas cercanas a los sensores deben ser representativas del sector de riego. Se debe considerar la variabilidad del suelo y las características del sistema radicular de las plantas. Se recomienda instalar múltiples sensores en diferentes áreas del terreno para obtener una visión más completa de la humedad

- ✓ Se deben posicionar sensores a diferentes profundidades para obtener datos sobre la distribución vertical de la humedad en el suelo. Se debe velar por que las profundidades de instalación coincidan con las zonas de enraizamiento de las plantas. Por lo general, en frutales, los sensores se instalan a diferentes profundidades dependiendo del frutal y el suelo, sin embargo las profundidades más comunes son 10 cm, 30 cm y 60 cm, para cubrir diferentes capas de raíces. El sensor a los 60 cm de profundidad debe ir instalado más cercano al tronco de la planta (por lo general a 10-30 cm del tronco en dirección de la hilera), mientras que los sensores de los 30 cm y 10 cm de profundidad deben ir entre 30-40 cm y 40-50 cm del tronco en dirección de la hilera, respectivamente. Sin embargo, estas recomendaciones pueden variar de acuerdo al cultivo, variedad, suelo y sistema de riego.
- ✓ Antes de la instalación, se debe preparar adecuadamente el suelo. Se sugiere remover cualquier obstáculo o piedra que pueda interferir con el contacto directo del sensor con el suelo, asegurándose de que esté suelto y bien compactado alrededor del sensor para garantizar una buena transferencia de humedad.
- ✓ Se debe realizar una calibración adecuada de los sensores antes de su instalación. Esto implica establecer una relación entre las lecturas del sensor y los niveles de humedad real del suelo. Se deben seguir las instrucciones del fabricante para llevar a cabo una calibración adecuada y asegurarse de obtener mediciones precisas.

Tensiómetros.

Los tensiómetros son equipos utilizados en la agricultura para medir la tensión ("esfuerzo") que el suelo ejerce sobre el agua para retenerla (Figura 36A), variando entre 0 100 cb. Estos consisten en un tubo sellado lleno de agua, el cual posee un bulbo poroso en la parte inferior y un vacuómetro (o medidor de vacío), que indica sus lecturas en centibar (cb) o kilo Pascales (kPa) en la parte superior (Figura 36B). El tensiómetro se instala en el suelo a la profundidad que se desea conocer su humedad, que depende de la profundidad de raíces del cultivo. El tensiómetro se equilibra con la humedad del suelo a través del bulbo de cerámica porosa. Si la cantidad de agua en el suelo es adecuada el tensiómetro mostrará valores cercanos a 10 cb, por el contrario, si el agua es escasa esta tenderá a salir a través del bulbo de cerámica porosa y se formará un vacío dentro del tubo, lo que se verá reflejado en el vacuómetro e indicará la necesidad de regar. La tensión medida para decidir el momento de riego depende de la textura, por ejemplo en un suelo arenoso es de 20 cb, en un suelo limoso sobre 30 cb y en un suelo arcilloso sobre 50 cb.

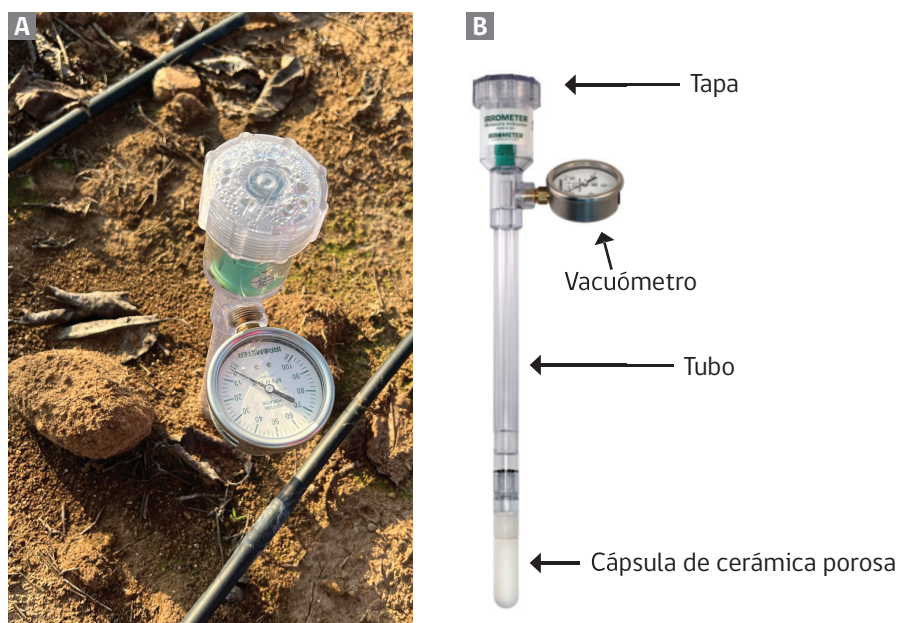


Figura 36. Tensiómetro análogo instalado (A) y partes de un tensiometro (B).

Algunas de las ventajas del tensiómetro son:

- ✓ Muy rápido y práctico para medir la tensión del agua del suelo en el momento (medición discreta).
- ✓ Bajo costo.
- ✓ Fácil instalación.
- ✓ La medición no se ve influenciada por el contenido de sales del agua del suelo.

Entre las desventajas del tensiómetro destacan:

- ✓ No mide directamente el contenido de agua del suelo, por ello se debe utilizar la curva de retención de humedad para cada tipo de suelo, la cual relaciona el contenido de humedad con la tensión a la que está retenida.
- ✓ Requieren de mantenimiento periódico y varios tensiómetros en una planta.
- ✓ No funcionan en suelos muy secos o de texturas gruesas (suelos arenosos).

Sensores eléctricos.

Los sensores eléctricos utilizan la tecnología de reflectometría para estimar la cantidad de agua que hay en el suelo circundante al sensor. Los sensores envían un pulso electromagnético a través del suelo, y se mide "cuánto" de ese pulso eléctrico vuelve al sensor. Esta es una técnica de medición indirecta del contenido de agua del suelo. Los sensores eléctricos se pueden conectar a un registrador de datos para almacenar la información y/o nodo de telemetría para transmitir los datos y visualizarlos a través de una plataforma web en un PC o una aplicación móvil en un smartphone, proporcionada por la empresa proveedora de los servicios.

SENSORES TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY).

El TDR mide el contenido de humedad volumétrico del suelo circundante al sensor, es decir entrega un valor de humedad promedio para el largo de la varilla (Figura 37). Como ejemplo, en la Figura 37, se muestran los sensores que miden solo contenido de humedad (1 y 2) y contenido de humedad, conductividad eléctrica y temperatura (3 y 4).



Figura 37. Diferentes tipos de sensores TDR.

Alguna de las principales ventajas del TDR son:

- ✓ Las varillas son relativamente fáciles de instalar.
- ✓ Método no destructivo.
- ✓ El resultado de la medición se obtiene de forma inmediata.
- ✓ Permite realizar muchas mediciones simultáneas en el mismo punto de medición.

Las principales desventajas del TDR son:

- ✓ Alto costo.
- ✓ Requiere buen contacto entre el suelo y las varillas de acero insertadas en él.
- ✓ Presenta problemas en suelos con alto contenido de sales y materia orgánica, en suelos de textura gruesa y fina, especialmente si se encuentran en una condición de seco.
- ✓ No son aptos para suelos con un alto porcentaje de pedregosidad.
- ✓ Se requieren varios sensores para una misma planta.

SENSORES FDR (FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY).

Los sensores FDR miden el contenido de humedad volumétrico del suelo a diferentes profundidades en el área circundante del sensor. Por lo general la medición de la humedad se realiza en un radio de 5 a 10 cm desde el sensor (Figura 38), la profundidad de la sonda es de 1 m y con 6 sensores a profundidades de 10, 20, 40, 60, 80 y 100 cm. Adicionalmente, existen sondas FDR que miden variables adicionales como la temperatura y/o la conductividad eléctrica del suelo. Para medir la humedad del suelo, la sonda FDR cuenta con “anillos de medición” (Figura 38B) a lo largo del sensor, muchas veces regulables a la profundidad deseada. Estos pueden ser del tipo fijas, los que se instalan en terreno y miden solo ese punto, pero permiten tener mediciones continuas; o bien del tipo portátiles, las cuales permiten medir en varios puntos, pero con mediciones discretas en el tiempo. Para usar la sonda FDR portátil es necesario instalar tubos de PVC que se mantendrán fijos en el huerto y cada vez que se desee medir, la sonda se debe introducir en ellos. En el caso de la Figura 38A se observa una sonda FDR del tipo fijo que permite mediciones continuas en el tiempo.

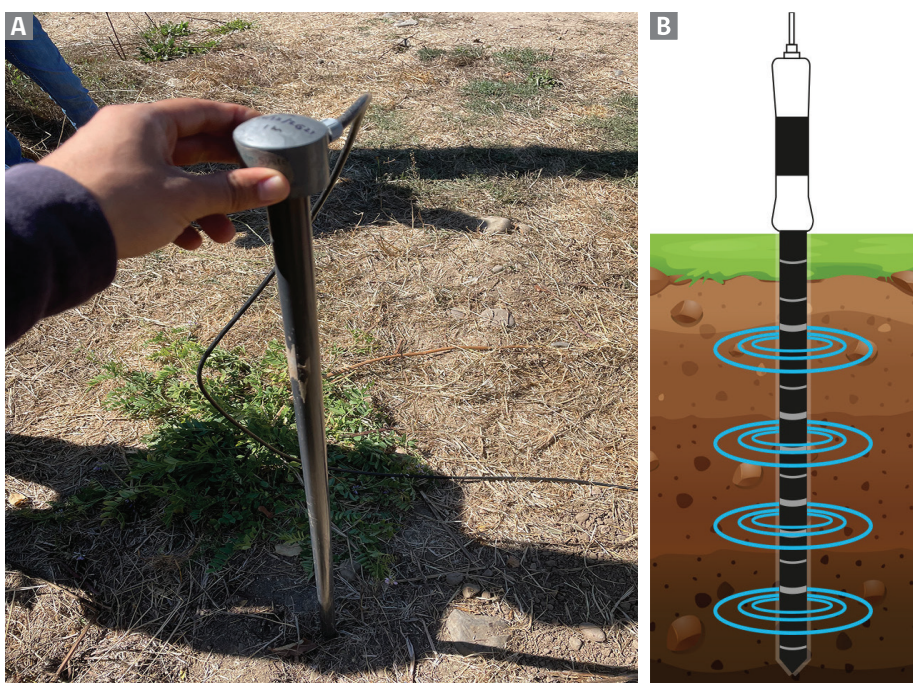


Figura 38. Sonda de humedad FDR.

Las principales ventajas de la sonda FDR son:

- ✓ Permite colocar sensores en diferentes profundidades en el mismo tubo de acceso y realizar medidas del contenido de agua en todas las profundidades.
- ✓ Permite realizar medidas continuas del contenido de agua en el suelo en el mismo punto de medición.
- ✓ Permite tener mediciones en varios puntos (sonda portátil).

Algunas de las desventajas de la sonda FDR son:

- ✓ La instalación no es fácil, ya que es crítico mantener un buen contacto con el suelo. Más aún, para la sonda FDR portátil, que necesita un tubo de acceso (PVC) para realizar la medición, es crítico que la pared exterior del tubo de PVC quede con buen contacto con el suelo. De no cumplirse este requisito, las mediciones serán erróneas.
- ✓ Alto costo.
- ✓ Baja precisión en suelos de textura muy fina (arcillosos y/o limosos).

SENSORES DE MATRIZ GRANULAR.

Los sensores de matriz granular miden la resistencia eléctrica para estimar la tensión del suelo y responden a sus cambios de humedad de acuerdo con la profundidad en que estos son instalados. Aunque la resistencia eléctrica se mide en ohm, el registrador de datos convierte automáticamente la lectura a centibares. La resistencia eléctrica aumenta a medida que disminuye la humedad del suelo. La Figura 39 muestra un sensor de matriz granular llamado Watermark®. Este sensor funciona de manera similar a los sensores de bloques de yeso, sin embargo, difiere de este porque es más duradero en el suelo y puede responder mejor a los cambios de humedad.

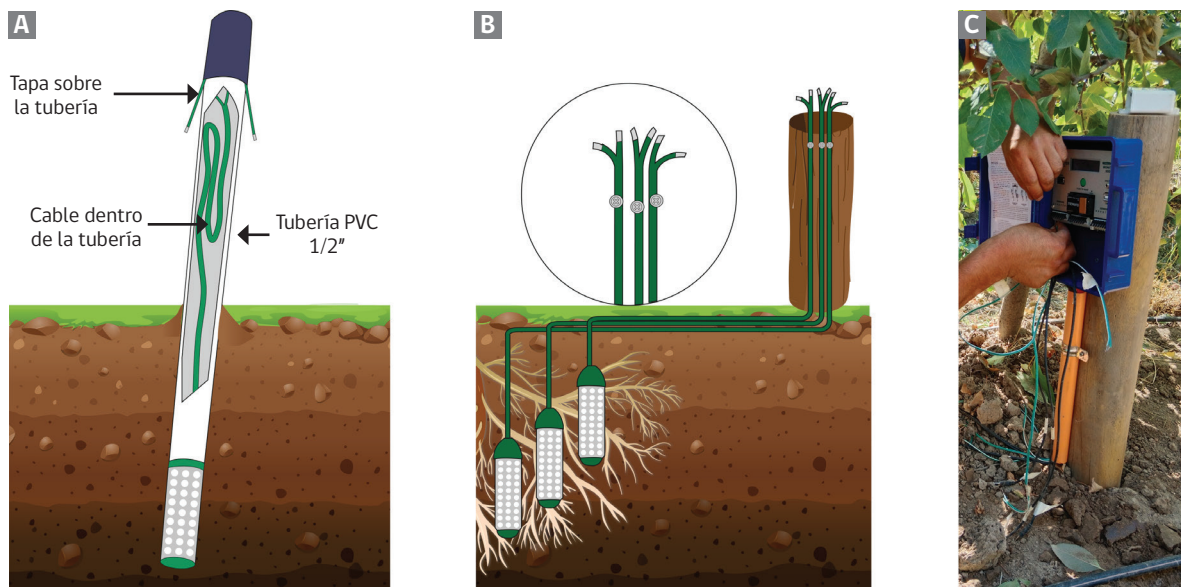


Figura 39. Sensor Watermark® instalado con tubería (A), sin tubería (B) y en el huerto (C).

Dentro de las principales ventajas del sensor Watermark® se encuentran:

- ✓ Se adaptan a la mayoría de los suelos.
- ✓ Pueden reflejar tensiones entre los 0 y los 255 cb.
- ✓ Compensan las variaciones de salinidad del suelo.

Algunas de las desventajas del sensor Watermark® son:

- ✓ Costo elevado.
- ✓ En suelos secos (tensiones mayores a 70 a 80 cb) las mediciones se alteran.
- ✓ Se requieren varios sensores para una misma planta.

En general los sensores que miden la humedad de suelo permiten su control y monitoreo en forma continua, son muy útiles para indicar cuando comenzar un riego para un nivel de humedad establecido. También se utilizan para indicar cuando detener el riego y permiten observar la infiltración del agua en profundidad, asegurando que el agua de riego llegue a la zona de raíces y no existan pérdidas por percolación.

Sensores para medir el estado hídrico del cultivo y desarrollo del fruto

Los sensores de planta son utilizados para verificar el estado hídrico de los cultivos y pueden entregar una medición precisa para la gestión del riego. Estas mediciones pueden realizarse en distintas partes del cultivo como en el tronco, frutos y hojas.

Dendrómetro.

Los dendrómetros son instrumentos que pueden medir continuamente las pequeñas fluctuaciones (contracción y expansión) del diámetro del tronco, tallos, peciolo o frutos. Los órganos de la planta, ya sea fruto, tallo o tronco tienen similares comportamientos, es decir, durante la noche se produce el fenómeno de expansión y durante el día los órganos se contraen. Lo que importa es que la sumatoria de las expansiones sea mayor a la sumatoria de las contracciones para que en el resultado final sea un crecimiento positivo del órgano. Por lo tanto, los dendrómetros pueden usarse para mejorar la programación del riego en frutales ya que permiten detectar, identificar y cuantificar el estrés hídrico.

Los dendrómetros de fruto (Figura 40) monitorean el crecimiento de la fruta al medir las variaciones en su diámetro en tiempo real. Son útiles para identificar cómo la estrategia de riego utilizada en el huerto está favoreciendo positiva o negativamente en el crecimiento del fruto. Este indicador tiene una correlación directa con el estrés hídrico de la planta, por lo que identificar de forma temprana el crecimiento o decrecimiento del fruto en fechas determinantes para el cultivo podría evitar pérdidas de calidad y/o rendimiento.



Figura 40. Dendrómetro de fruto instalado en palto.

Potencial hídrico de la planta.

Un manejo de riego erróneo durante el establecimiento de la canopia puede disminuir o frenar el desarrollo del cultivo y, en consecuencia, limitar su productividad a largo plazo y la sostenibilidad económica del huerto. Por ejemplo, en manzanos adultos, el riego se puede utilizar como una herramienta para controlar el tamaño de la fruta, ya sea maximizándolo en cultivos de frutos más pequeños o limitándolo en cultivos susceptibles a presentar desórdenes. En este sentido, el medir el estado hídrico de los cultivos proporciona información directa sobre las limitaciones del riego, que, en combinación con la experiencia y el conocimiento de los agricultores, se puede utilizar para tomar decisiones sobre el manejo del agua.

El potencial hídrico considera la ruta completa del agua a través del árbol, la cual empieza en las raíces, en donde el agua disponible en el suelo es absorbida y transportada por el xilema hacia el tallo, hasta llegar a la fruta y a las hojas en donde se evapora. A través de los años, se han estudiado diversas maneras de medir el estado hídrico de los cultivos continuamente, sin embargo, ninguna de ellas mide directamente el potencial hídrico de la planta. En la actualidad existe un sensor llamado “microtensiómetro” que es insertado en el tronco del cultivo para medir el potencial hídrico del xilema. El microtensiómetro mide continuamente la tensión del agua en el tronco, indicando la fuerza con la que el tejido leñoso retiene el agua. Este avance es un paso importante para el monitoreo continuo del estado hídrico de los cultivos (Figura 41).



Figura 41. Microtensiómetro instalado en un huerto de manzanos. Nodo de transmisión de datos (A) y microtensiómetro instalado (B).

Por ejemplo, si el microtensiómetro registra mayor tensión significa que hay menor agua disponible en el tallo, es decir el acceso al agua es limitado. Esta medida se conoce como el potencial hídrico del tallo y es el indicador más confiable para determinar el estrés hídrico en árboles, vides y arbustos.

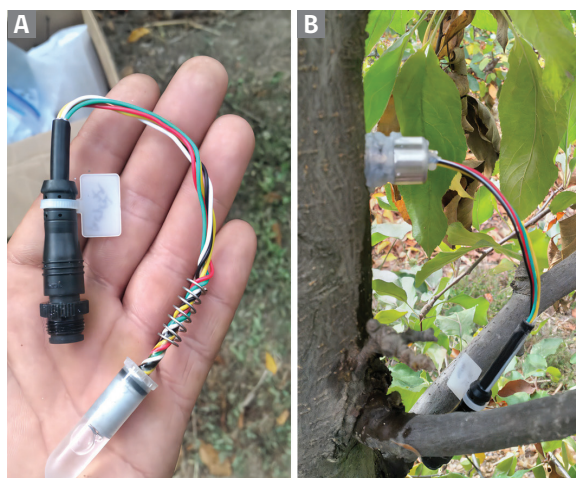


Figura 42. Microtensiómetro previo a la instalación (A) e instalado en el tronco (B).

Una de las alternativas en el mercado para adquirir un microtensiómetro es la marca FloraPulse®. Algunas de las ventajas que tiene éste es que mide continuamente el potencial hídrico del tallo, almacenando los datos en una plataforma web para integrarse y ayudar a la toma de decisiones del manejo de riego. Entre sus desventajas se puede decir que el dato es puntual de un árbol y que difícilmente representa a la mayoría del huerto.

Para interpretar los datos del microtensiómetro, idealmente, nos interesa el valor mínimo diario registrado al mediodía o al inicio de la tarde. Por ejemplo, si tuviéramos un microtensiómetro instalado en manzanos los rangos de potencial hídrico de tallo para tener en cuenta son:

- ✓ Valores mayores a $-0,7$ MPa (altos) pueden generar un crecimiento vegetativo excesivo.
- ✓ Entre $-0,7$ y $-1,8$ MPa representan valores de buena condición hídrica para el frutal.
- ✓ Bajo $-2,5$ MPa significa que el agua no puede fluir libremente a través del árbol y es retenida en este. El proceso de transpiración, fotosíntesis y crecimiento de la fruta disminuyen drásticamente.
- ✓ Bajo $-4,0$ MPa significa daños estructurales al árbol, limitando la producción de la temporada y posiblemente la del próximo año.

En general los sensores que ven el estado hídrico de la planta permiten verificar si los riegos fueron programados de forma adecuada tanto en cantidad como en su frecuencia (retroalimentación). Existen alternativas que permiten el monitoreo continuo del estado hídrico, aunque disponible para algunas especies solamente.

Mantenimiento de sensores de clima, suelo y planta

La mantención de los equipos y sensores utilizados en la operación y manejo de los sistemas de riego es fundamental. Una buena práctica para considerar por los agricultores sobre el uso de los sensores es que siempre se debe realizar la mantención de los sensores de acuerdo a las recomendaciones realizadas por el fabricante (considerar manual de uso). Para llevar a cabo correctas mantenciones a los sensores es necesario capacitarse, esto ayudará a las buenas prácticas de uso y prolongará la vida útil de equipos y sensores. A continuación, se muestran conocimientos básicos de apoyo para realizar la mantención de los principales sensores utilizados en la agricultura. La metodología que aquí se presenta se puede aplicar para realizar tareas básicas, sin embargo, cada proveedor recomendará en el manual de usuario tareas de instalación, operación y mantención dependiendo del tipo, modelo, marca y uso del sensor.

Mantenimiento de la estación agrometeorológica.

La mantención debe realizarse a lo menos dos veces al año, antes de iniciar la temporada de riego y posterior a ella. Es recomendable que se revise una vez cada 10-15 días. Dentro de las acciones a realizar se contempla:

Limpieza del pluviómetro y balancín: Para eso se debe retirar del receptáculo del pluviómetro cualquier basura que obstaculice el buen flujo del agua (Figura 43A). Además, se debe verificar que el balancín está funcionando correctamente (Figura 43B) y no se encuentra trabado o con alguna suciedad (por ejemplo, telas de araña u hojas).

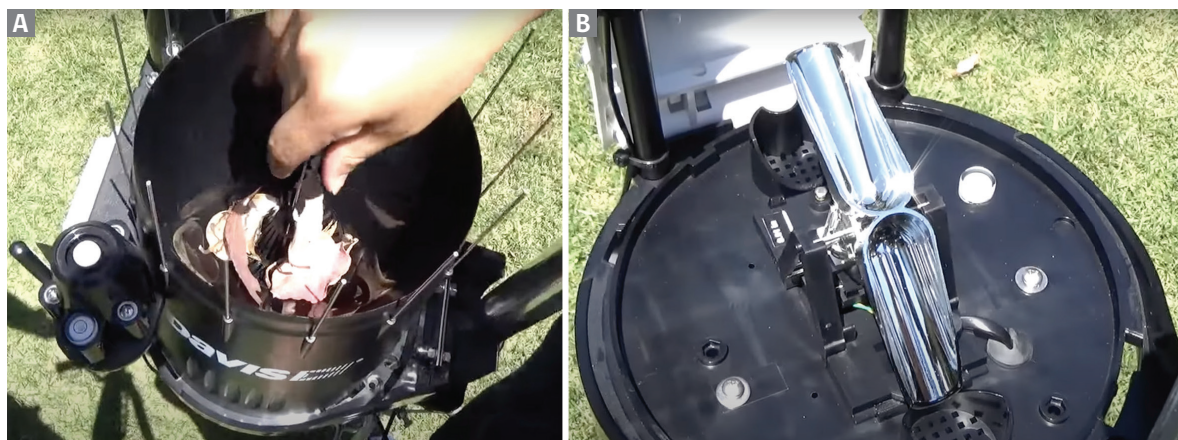


Figura 43. Pluviómetro (A) y balancín (B).

Limpieza del piranómetro: Usar un paño limpio con agua destilada para retirar el polvo que se pueda acumular sobre el sensor. No tocar con las manos el sensor ya que esto podría dañarlo (Figura 44).



Figura 44. Limpieza del sensor de radiación.

Limpieza del anemómetro y veleta: Con un paño y un cepillo se deben limpiar los plásticos y la suciedad que se acumulen en la veleta y anemómetro (Figura 45).



Figura 45. Limpieza del sensor de velocidad (anemómetro) y dirección del viento (veleta).

Limpieza del sensor de temperatura y humedad relativa del aire: Con un paño y un cepillo limpiar los plásticos y suciedad que se acumulen en el domo (Figura 46). Se debe tener precaución con el sensor dentro del domo puesto que cualquier golpe puede provocar un mal funcionamiento en el futuro.



Figura 46. Limpieza sensor de temperatura y humedad ambiental.

Finalmente, debemos chequear que la EMA se encuentre bajo las condiciones de instalación recomendadas. Es aconsejable corroborar con un nivel que el mástil de la estación se encuentra en 90° con respecto a la superficie y que los sensores están nivelados.

Mantenición sensores de humedad.

Para los sensores de humedad TDR, FDR y tensiómetros digitales se debe validar al menos una vez por mes que:

- ✓ **Los laterales de riego se encuentran correctamente instalados:** La fijación de los laterales cercanos al sensor, como muestra la Figura 47, pueden ser útiles para disminuir el movimiento de ellos.
- ✓ **Panel solar del nodo de telemetría asociado al sensor:** Se debe limpiar con un paño húmedo para remover polvo y suciedad. Es importante mencionar que todos los sensores pueden ser conectados a dicho nodo para transmitir los datos para que puedan ser visualizados en una aplicación de celular, tablet o PC.
- ✓ **Verificar ubicación representativa:** Se debe verificar que la planta monitoreada se encuentre en óptimas condiciones. En el caso que la planta que elegimos se encuentre enferma o deteriorada se debe cambiar el punto de instalación de la sonda a una planta representativa del campo. Además, se debe verificar que los emisores cercanos no están tapados.

Adicionalmente, es transversal para los sensores de humedad que se debe corroborar su buen estado y revisar que no hayan sido golpeados o vandalizados, ya sea respecto del mismo sensor como su cableado y el datalogger cuando corresponda.

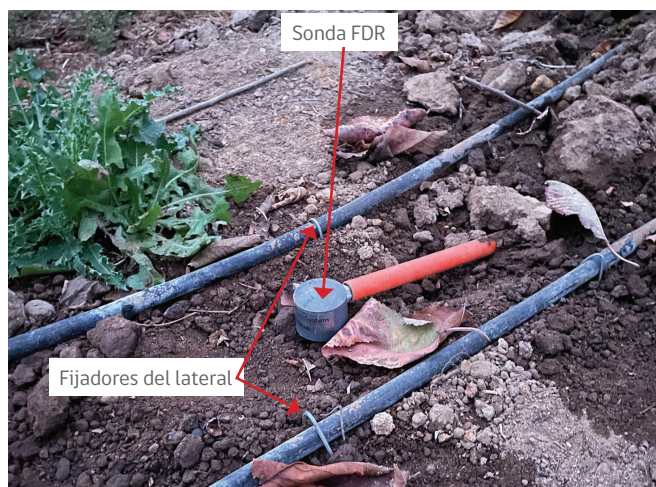


Figura 47. Validación de la instalación de la sonda de humedad FDR.

Para los tensiómetros análogos se debe corroborar semanalmente que en su interior se mantenga el nivel de agua destilada y que no contenga burbujas de aire. Una mala mantenimiento del tensiómetro análogo provocará una lectura errónea de la tensión. Por ejemplo, si el sensor se encuentra sin agua destilada en su interior, el vacuómetro mostrará una lectura de 0 cb, lo que representaría un suelo saturado, sin embargo, puede significar que el suelo se encuentra extremadamente seco o perdió agua por evaporación por haber quedado mal cerrada la tapa de registro.

Mantenición de sensores del estado hídrico del cultivo.

En el caso del dendrómetro y el microtensiómetro FloraPulse® se debe corroborar que:

- ✓ **Panel solar:** Se debe limpiar con un paño húmedo para remover polvo y suciedad.
- ✓ **Verificar ubicación representativa:** En el caso que la planta que fue seleccionada se encuentre enferma o no sea una planta representativa del huerto se debe cambiar el punto de instalación de los sensores a una planta en estado óptimo y representativa del campo.

Para el caso particular del dendrómetro instalado en un fruto la supervisión recomendada podría ser más frecuente (7 a 10 días) para tener certeza que el sensor se encuentra en contacto directo con el fruto, por lo general, debido a su sensibilidad al movimiento pierde adhesión al fruto.

A close-up photograph of a blueberry branch with several ripe, dark blue berries and green leaves. The image is overlaid with a semi-transparent blue rectangle in the top right corner, which contains the chapter title. The entire image has a blue color cast.

CAPÍTULO 4

Procesamiento de datos de campo y recomendaciones de riego.

Programa
Transferencia tecnológica en programación
y control de riego tecnificado.

Programación de riego en base a información de estaciones agrometeorológicas

Las estaciones agrometeorológicas automáticas (EMA) (Figura 48) permiten registrar, almacenar y mostrar al usuario las variables ambientales que son utilizadas en la programación del riego. Las variables climáticas como: radiación solar, temperatura y humedad relativa del aire y velocidad del viento, se utilizan para calcular el consumo de agua de las plantas a través de la evapotranspiración de referencia (ETo) y un coeficiente específico de cultivo (Kc). El coeficiente Kc es variable durante la temporada de riego ya que considera las etapas fenológicas del cultivo. Así se obtiene la cantidad de agua que necesita una planta, término más conocido como la evapotranspiración de cultivo (ETc).



Figura 48. Estación agrometeorológica automática (EMA).

La programación del riego consiste en reponer el agua requerida por la planta para su óptimo desarrollo, en el momento y en la cantidad adecuada, para así obtener el máximo rendimiento con una calidad adecuada. La programación del riego en base a EMAs se realiza en función del clima, con datos obtenidos desde una estación que puede estar ubicada en el mismo predio, o bien, desde una estación cercana y que sea representativa del lugar donde se ubica el huerto. Es importante que la EMA que se utilice para el cálculo de la ET_c este instalada en condiciones estándar sobre una superficie homogénea de pasto bien regada.

La Figura 49 muestra 7 variables agrometeorológicas medidas y estimadas desde una EMA durante una semana. La Figura 49-1 muestra la estimación de la ET_o y la precipitación diaria medida en mm, mientras mayor sea la evapotranspiración y la precipitación, más alta serán las barras de color celeste y verde, respectivamente.

La Figura 49-2 muestra la temperatura (T°), humedad relativa (HR) del aire y la temperatura del punto de rocío. La Humedad en un ambiente es relativa a su temperatura, es decir, cuando aumenta la temperatura se expande el volumen de aire y por lo tanto el contenido relativo de agua en ese volumen se reduce, por esta razón a medida que la T° disminuye la HR aumenta y viceversa. Conocer la T° y HR es muy importante ya que son fundamentales para saber qué capacidad tiene el ambiente de demandar el agua que está evapotranspirando una superficie de cultivo. En general si aumenta la temperatura mayor será la ET_c y por el contrario mientras mayor sea la HR menor será el consumo de agua por las plantas.

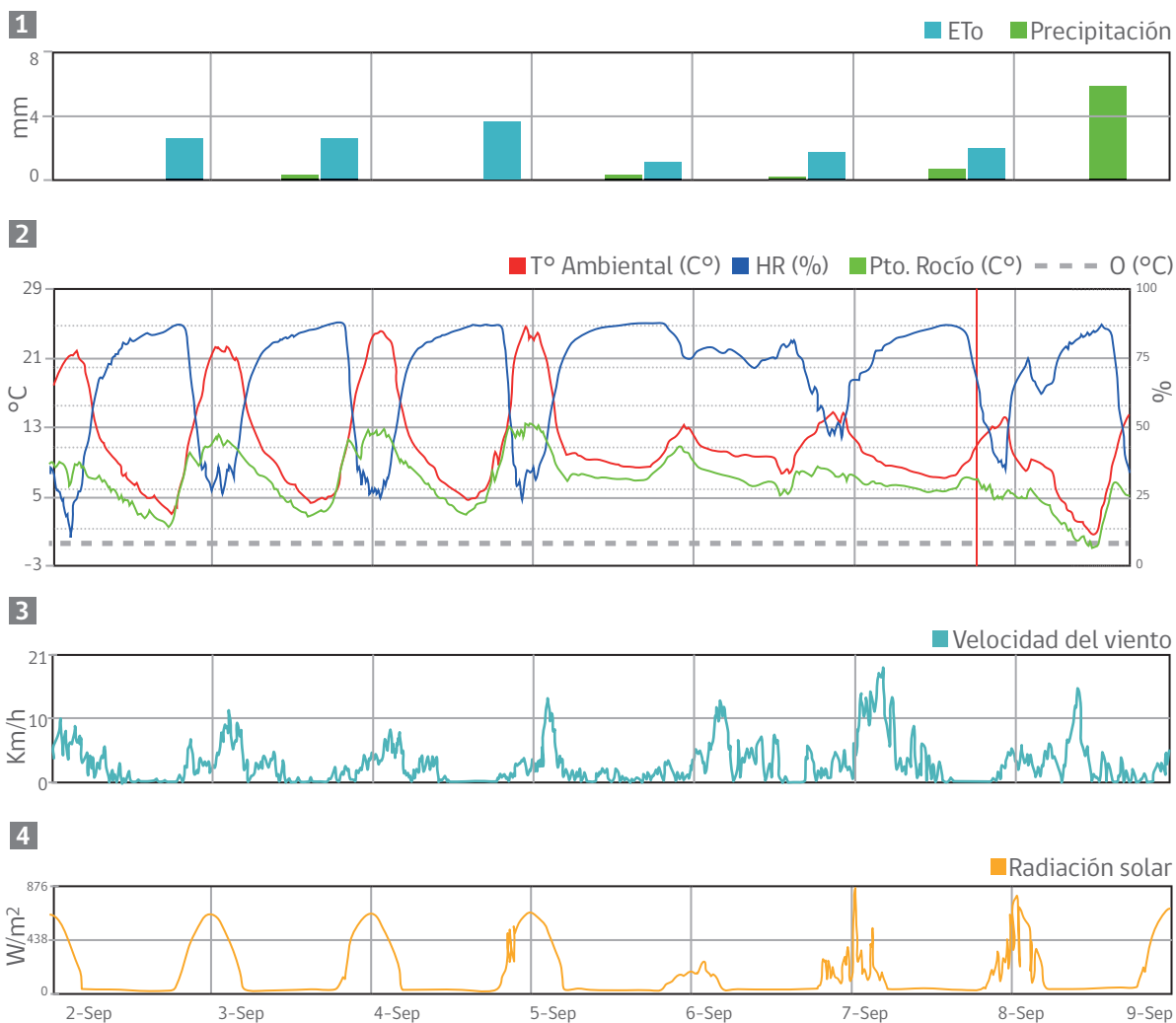


Figura 49. Registro de variables agrometeorológicas descargadas desde una EMA. 1. ET_o (mm/día) y precipitación (mm), 2. Temperatura ($^\circ C$) y humedad relativa del aire (%), 3. Velocidad de viento (km/h) y 4. Radiación solar (W/m^2).

La Figura 49-3 muestra la variabilidad que existe en la velocidad del viento. Los registros de viento están muy influenciados por el entorno de las EMAs y en general a mayor velocidad de viento mayor será la ETc. Finalmente, la Figura 49-4 muestra la radiación solar (Rs), en ella es posible observar que los primeros días de la semana son días despejados mientras los días 6, 7 y 8 de septiembre son días con menos radiación producto de la presencia de nubosidad. Todas las variables mostradas en la Figura 49 permiten estimar la ETo en mm/día del área de interés.

Desde la Figura 49 se observa además que las variables medidas por la EMA se complementan y ayudan a entender el entorno climático donde se encuentra el cultivo. Por ejemplo, un día despejado (3-Sep en la Figura 49) la radiación solar es alta (800 W/m²), velocidad de viento promedio de 6 km/h, T° y HR a medio día de 22°C y 25%, respectivamente, y una ETo de 3,5 mm/día. Por el contrario, para un día nublado (6-Sep en la Figura 49), la radiación solar y T° disminuyeron, mientras que la HR y la velocidad de viento se incrementaron, por lo que la ETo fue de solo 0,8 mm/día.

Conocer la ETo sirve para cuantificar la cantidad de agua que demanda el cultivo. A partir de los datos de ETo y considerando el Kc específico para el cultivo – donde se debe tener en cuenta el periodo fenológico, variedad, edad de la planta, sistema de conducción y sistema de riego – se estima la ETc. Para obtener los valores referenciales de Kc según el desarrollo del cultivo se sugiere consultar el Capítulo 1, sección determinación de requerimiento hídrico de una planta, en la que se sugiere el uso de la Plataforma Agrícola Satelital de Chile (PLAS) que es gratuita, de cobertura nacional y administrada por el INIA.

En general existe consenso que los datos desde las EMAs permiten estimar la ETc y por consiguiente permiten contestar de muy buena manera la pregunta básica inicial de programación de riego: ¿cuánto regar?

Por ejemplo, de acuerdo con los datos presentados en la Tabla 11 para el cultivo de avellano europeo en la comuna de San Rafael, región del Maule, se puede estimar cuánto regar si conocemos la evapotranspiración de referencia desde una EMA y un valor adecuado de coeficiente de cultivo.

Tabla 11. Antecedentes de un cultivo de avellano europeo en la comuna de San Rafael, región del Maule, para determinar cuánto regar.

Programa de riego			
Cultivo	Avellano europeo	Mes	Enero
DSH	2,5 m	Kc del mes	0,95
DEH	5,0 m	Caudal del emisor	4 L/h
N° laterales de riego por hilera	2	N° emisores/ planta	10
Capacidad de campo	20 %vol	Intensidad de Precipitación del Equipo	3,2 mm/h
Punto de marchitez permanente (PMP)	12 %vol	Caudal de aplicación del sistema por planta	40 L/h por planta
Criterio de riego (CR)	50 %	Espaciamiento de emisores	0,5 m
Agua fácilmente aprovechable para la planta (AFA)	18 mm	Eficiencia de aplicación	90 %
Profundidad de raíces	50 cm	CUC	85 %

DSH: distancia sobre hilera; DEH: distancia entre hilera; CUC: coeficiente de uniformidad.

Si la ETo obtenida desde una EMA es de 6 mm/día, la evapotranspiración del cultivo será de:

$$6 \times 0,95 = 5,7 \text{ mm/día}$$

Como el sistema no es 100% eficiente será necesario aplicar $5,7/0,9 = 6,33$ mm/día. El equipo de riego es capaz de aplicar 3,2 mm/h, es decir para aplicar 6,33 mm será necesario programar un tiempo de riego de $6,33/3,2 = 2$ horas aproximadamente.

Supongamos ahora que nuestra estrategia es regar cada tres días, entonces se deben acumular los valores de ETo para esos tres días. Supongamos que los tres días registran valores de 5,5, 6,1 y 6,4 mm/día. La ETo total es de 18 mm, así la evapotranspiración de cultivo ETc será:

$$18 \times 0,95 = 17,1 \text{ mm en 3 días}$$

Como el sistema no es 100% eficiente será necesario aplicar $17,1/0,9 = 19$ mm. El equipo de riego es capaz de aplicar 3,2 mm/h, es decir para aplicar 19 mm será necesario programar un tiempo de riego de $19/3,2 = 5,94$ horas, o 5 h y 56 min.

En conclusión, está muy claro que el uso de los registros de la evapotranspiración de referencia desde una EMA y coeficientes de cultivo adecuados permiten determinar fácilmente cuánto regar en mm y permiten estimar el tiempo de riego en horas y minutos.

Control y monitoreo del riego en base a información de sensores de humedad de suelo

Los sensores de humedad de suelo son potentes herramientas para el manejo y control del riego. Son utilizados ampliamente en todo tipo de cultivos y frutales generalmente para saber cuándo es necesario regar y observar cuánto profundizó el frente húmedo después de un evento de riego.

Para conocer cuándo iniciar el riego se requiere disponer del valor del contenido volumétrico de agua del suelo que se desea alcanzar, esto requiere conocer también sus contenidos de agua a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente. La determinación de las propiedades físico-hídricas del suelo permiten generar mejores planes de programación y de control. Información de la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la densidad aparente y textura, permite sectorizar y trabajar sobre unidades de manejo homogéneas. Además, tener un control del riego en base al agua que retiene cada sector y que consumen las plantas para satisfacer sus necesidades durante la temporada aumentará también la eficiencia en el uso del agua (Figura 50).



Figura 50. Sensores de humedad Watermark® instalados en cultivo de cerezos.

El control de la humedad del suelo permite conocer el nivel de disponibilidad de agua para el cultivo y poder apoyar la toma de decisiones en el predio. La humedad del suelo es posible medirla como contenido volumétrico de agua (ej. sondas FDR) o mediante la medición de la energía de retención de agua en el suelo (tensiómetros). Tanto la energía de retención como el contenido volumétrico del agua en el suelo están estrechamente relacionados, y a medida que disminuye el contenido de humedad, aumenta la energía de retención de esta en la matriz del suelo.

Por lo tanto, el control y monitoreo del riego en base a información desde sensores de humedad puede considerar instrumentos que miden la energía de retención del agua a través por ejemplo de sensores tipo Watermark® (Figura 51A) o instrumentos que cuantifican el contenido de humedad volumétrico del suelo mediante el uso de sondas tipo FDR (Figura 51B) o sensores TDR (ver Capítulo 3, sección sensores para medir la humedad del suelo).

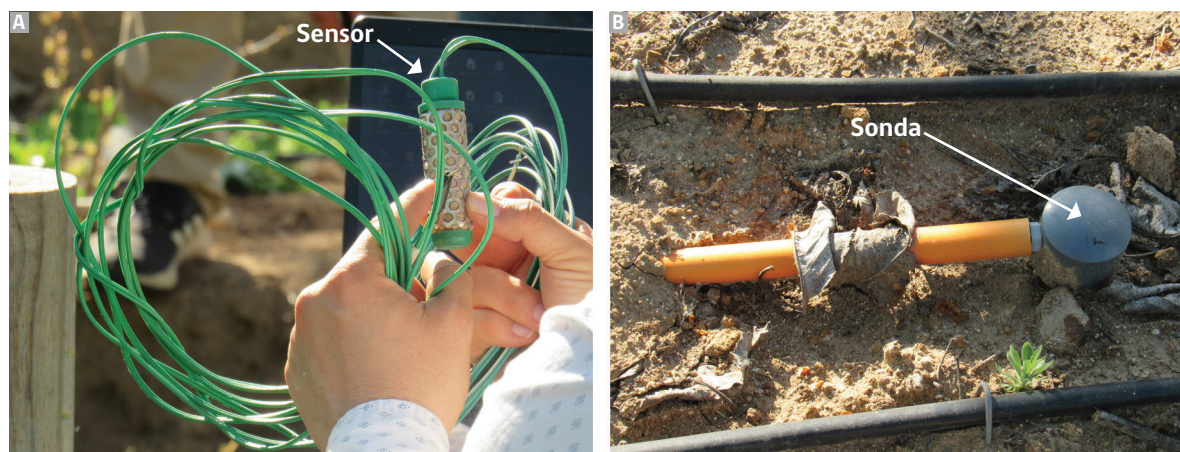


Figura 51. Sensor Watermark® (A) y sonda FDR (B).

Para una correcta gestión y control es primordial sectorizar y monitorear el suelo en unidades homogéneas. En otras palabras, es muy importante elegir cuidadosamente el o los lugares donde instalar los sensores, ya que estos deben ser representativos de las condiciones generales del terreno y del cultivo. Al mismo tiempo, es recomendable monitorear múltiples sensores en diferentes áreas del huerto para obtener una visión completa de la variabilidad espacial de las condiciones de humedad del suelo. En este sentido es necesario recordar que se debe realizar una calibración adecuada de los sensores, esto implica establecer una relación entre las lecturas del sensor y los niveles de humedad real del suelo.

Descripción de un típico gráfico de humedad de suelo: En la Figura 52 se observan datos de humedad de suelo de una sonda FDR. Por lo general, el eje horizontal de una gráfica de humedad de suelo representa el tiempo (hora, día, semana, etc.), mientras que el eje vertical representa el porcentaje de la humedad aprovechable entre 0-100% (0% es el contenido de humedad a Punto de Marchitez Permanente (PMP) y 100% es el contenido a Capacidad de Campo (CC), ver Capítulo 1, sección humedad aprovechable para la planta). Cuando los valores son superiores al 100% (área de color azul en la Figura 52) significa que el suelo está saturado, esto se puede encontrar con frecuencia posterior a un evento de riego o una lluvia importante. El criterio o umbral de riego (CR) es representado de color rojo en la Figura 52, por lo que es donde se debe tener especial cuidado en el manejo de riego, puesto que, si la humedad de suelo (línea de color negro en la Figura 52) alcanza el área achurada de color rojo es el momento de regar (punto A). Entre el límite de CC y CR (área achurada de color verde en la Figura 52) la planta se encuentra con una buena disponibilidad de agua en el suelo. El tiempo que transcurre entre el punto A y el B corresponde a la frecuencia de riego.

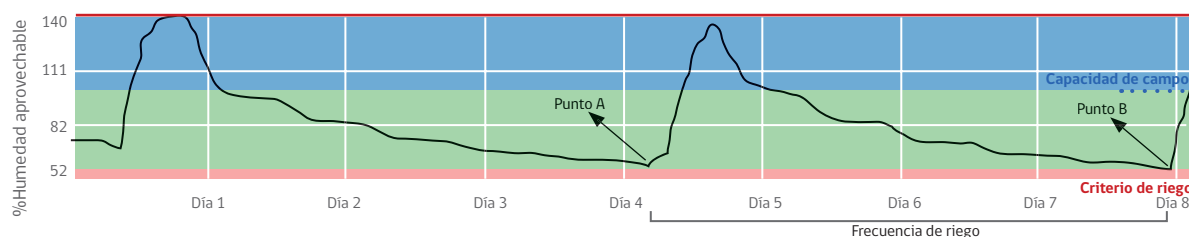


Figura 52. Visualización del contenido de humedad del suelo registrado por una sonda FDR.

Cuando se realiza un evento de riego o lluvia la humedad del suelo comenzará a aumentar, y si el riego o la precipitación son lo suficientemente largos, el suelo se saturará. En riego por goteo esto es normal que ocurra dentro de las primeras 24 h después de un evento de riego, posterior a ello la humedad debe mantenerse entre CC y el CR. A modo de ejemplo, en la Figura 53 se muestra un rectángulo negro con tres eventos de riego que sobrepasan la CC para diferentes profundidades de suelo, sin embargo 24 h después del evento de riego la humedad alcanza CC. Como se vio en el Capítulo 1, en frutales las raíces extractantes de agua, por lo general, no sobrepasan los 60–70 cm de profundidad y como se observa en la Figura 53 los sensores a los 80 y 100 cm de profundidad muestran una humedad constante en el tiempo. Esto quiere decir que la extracción de agua en esa profundidad de suelo es prácticamente nula y muestra además que el riego solo humedece hasta la profundidad de raíces, haciendo más eficiente el consumo de agua.

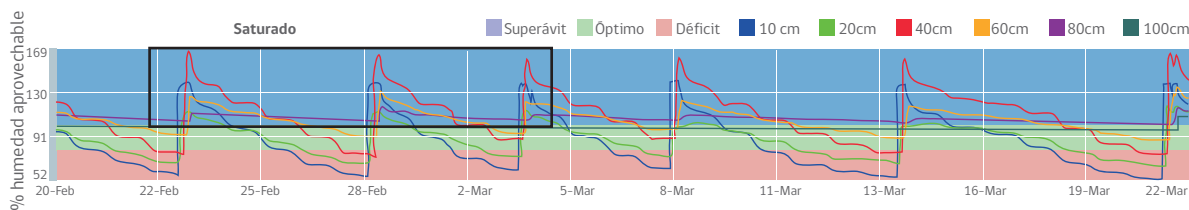


Figura 53. Contenido de humedad de suelo a distintas profundidades obtenido desde una sonda FDR.

El registro continuo de la humedad de suelo (día y noche) ayuda a conocer los patrones de extracción de agua de la planta. La extracción diurna está representada por el decrecimiento de la curva de humedad (el cultivo está consumiendo agua) y por otro lado mientras no exista un cambio en los valores de humedad esto representa que no hay consumo de agua desde la planta (noche). Estos efectos día y noche muestra la curva en forma de "escalera" entre un riego y otro (ver Figura 53). Por otro lado, cada vez que existe un aumento vertical rápido en la curva significa que ocurrió un evento de riego o lluvia de intensidad importante.

Si se desea programar un riego en función de los datos de humedad que entrega un sensor en un sector de riego se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. La sonda debe estar calibrada.
2. Conocer al menos los parámetros físico-hídricos del suelo (capacidad de campo (cm^3/cm^3 o $\%\text{vol}$), punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3 o $\%\text{vol}$) y el criterio de riego (ver Capítulo 1).
3. Conocer las características del sistema de riego (método de riego, número de laterales por hilera, número de emisores por planta, caudal del emisor (L/h) o bien la tasa de aplicación del sistema de riego (mm/h).
4. Conocer los parámetros del cultivo (marco de plantación (m^2), profundidad de raíces extractantes de agua (cm)).
5. Obtener la lectura del sensor de humedad de suelo usando una interfaz web, aplicación móvil o directamente desde el registrador de datos.

El monitoreo de la humedad de suelo permite determinar si el tiempo de riego calculado con los datos de ETc (ver Capítulo 4, sección programación de riego en base a información de estaciones agrometeorológicas) pueden ser considerados en 1 solo evento o en varios para evitar percolaciones profundas por superar la capacidad de retención de agua del suelo. Por ejemplo, si el tiempo de riego fue de 5 horas y la sonda FDR registró una humedad mayor a la capacidad de campo del suelo luego de 24 o 48 horas de realizado el evento, es recomendable disminuir el tiempo de riego o bien realizar más de 1 evento de riego para evitar percolación profunda.

Programar correctamente el riego es un paso importante para garantizar que las plantas dispongan de agua suficiente y evitar al mismo tiempo los costos excesivos de gastos de energía, las pérdidas de nutrientes y las repercusiones medioambientales asociadas al riego excesivo. Para beneficiarse de estos sensores, los regantes deben saber cómo interpretar y utilizar los datos para determinar cuándo y cuánto riego aplicar.

En conclusión, el uso de sensores de humedad es muy recomendable para monitorear y controlar el riego. Son una herramienta muy útil para determinar cuándo es necesario regar al alcanzar un nivel establecido de humedad, permite determinar las frecuencias de riego, las dinámicas de extracción de agua durante el día y la noche a diferentes profundidades y sobre todo conocer en profundidad cuanto avanza el frente húmedo después de un riego.

Control de riego en base a información de sensores de planta

En la actualidad existe una gran gama de herramientas y sensores capaces de medir diferentes variables para definir las estrategias de riego. Los sensores que miden condiciones del suelo y variables climáticas son fundamentales para el manejo de agua intrapredial. Sin embargo, la información que entregan estos sensores es utilizada de forma indirecta para mantener a los cultivos en condiciones óptimas evitando el estrés hídrico. Esta práctica depende en gran medida en la experiencia y habilidad para manejar la información entregada por los sensores (suelo y clima).

Por otro lado, existen sensores para medir directamente variables del estado hídrico de las plantas y frutos, como por ejemplo: sensores de hojas, tronco y frutos. Ellos permiten evaluar parámetros asociados al estado hídrico de las plantas y poseen la ventaja de integrar el continuo suelo - planta - atmósfera en un mismo indicador agronómico.

Dendrómetro.

Los dendrómetros son sensores que han sido ampliamente estudiados y miden continuamente las pequeñas fluctuaciones (contracción y expansión) del diámetro del tronco (Figura 54A) o los frutos (Figura 54B). Para mayores detalles revisar el Capítulo 3, sección sensores para medir el estado hídrico del cultivo y desarrollo del fruto.



Figura 54. Dendrómetro instalado en tronco (A) y fruto (B).

La alta sensibilidad de los dendrómetros, sobre todo el de frutos, significa una ventaja en la medida que permite tener datos de muy alta calidad, y una desventaja en cuanto a que cualquier perturbación física descalibrará el sensor y generará datos inadecuados. Esto se debe tener en cuenta a la hora de realizar labores como aplicaciones de productos fitosanitarios, cosecha, etc. Es importante destacar que este tipo de dispositivos muestran las tasas de crecimiento (tallos y frutos) que se relacionan con el estado hídrico de la planta, pero NO permiten cuantificar en forma directa cual es la cantidad de agua que se debe aplicar. A continuación, se muestran los datos medidos por un dendrómetro instalado en un fruto en un huerto de paltos (Figura 55).

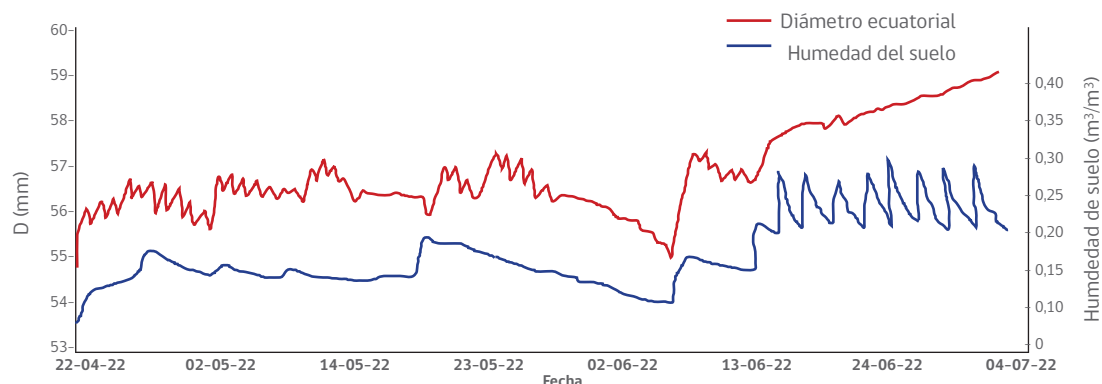


Figura 55. Crecimiento de fruto, diámetro ecuatorial (D) y humedad de suelo con respecto al tiempo en un huerto de paltos.

Se observa de la Figura 55 que el diámetro ecuatorial del fruto (D) se encuentra en rango de 5 a 6 cm durante fines de abril y principios de julio, presentando un crecimiento de 5 mm en este rango de tiempo. Al relacionar el crecimiento del fruto con la humedad de suelo del huerto, se observa una directa relación en el crecimiento con el manejo de riego del huerto. A medida que aumenta la frecuencia de riego el crecimiento del fruto aumenta linealmente, mientras que cuando el manejo de riego restringe levemente la aplicación de agua, el fruto decrece levemente (entre el 20 de mayo y 10 de junio del 2022). Esto demuestra que el crecimiento del fruto es un buen indicador del estado hídrico de la planta, pues tiene una directa relación con la humedad del suelo.

Microtensiómetro FloraPulse®.

El microtensiómetro es un sensor que mide continuamente el potencial hídrico del xilema (ver Capítulo 3, sección sensores para medir el estado hídrico del cultivo y desarrollo del fruto). Una vez instalado el sensor FloraPulse® permitirá el monitoreo continuo del potencial xilemático de la planta y se podrá observar de cerca un regulador clave del crecimiento y la calidad de la fruta. Como se mostró en el Capítulo 3, sección sensores para medir el estado hídrico del cultivo y desarrollo del fruto, valores más negativos (por ejemplo un valor referencial de $< -2,0$ MPa), muestran un estrés más severo, que generalmente ocurre a media tarde cuando las tasas de pérdida de agua son más altas. Por el contrario, valores menos negativos (por ejemplo valores referenciales entre $-0,7$ y $-1,8$ MPa) representan valores de buena condición hídrica para el frutal. La medición continua del potencial xilemático en conjunto con el clima brinda información valiosa para comprender mejor cuánto estrés se alcanza y cómo los ciclos de riego favorecen/afectan el estrés de la planta. Además, sirven para monitorear si los límites de humedad incluyendo el criterio de riego (CR) definidos con los sensores son los correctos e incluso permiten definir CR variables durante la temporada dado que los estados fenológicos del huerto pueden demandar contenidos variables de humedad en el suelo. A continuación, se muestran datos medidos por un microtensiómetro instalado en un huerto de manzanos (Figura 56).

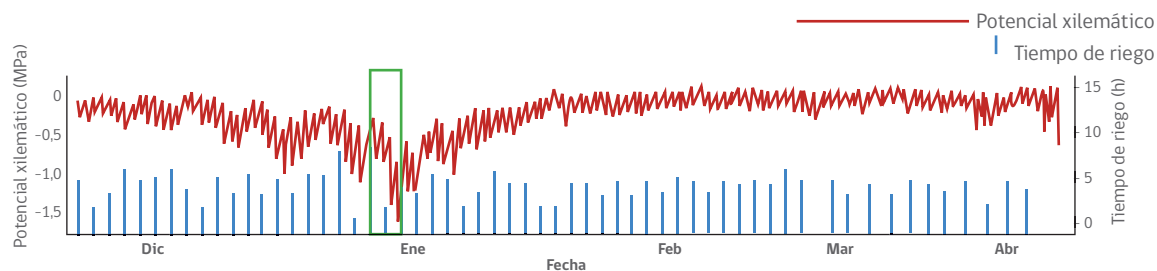


Figura 56. Potencial xilemático medido por un microtensiómetro FloraPulse® y tiempo de riego para los meses de máxima demanda de un cultivo de manzanos.

Se observa de la Figura 56 que el potencial xilemático en gran parte de la temporada de riego se encuentra entre 0 y $-0,9$ MPa. Sin embargo, para las dos últimas semanas de diciembre el potencial xilemático alcanzó valores de $-1,9$ MPa (recuadro de color verde en la Figura 56). Es necesario recordar que dependiendo del frutal valores más negativos que $-2,0$ MPa podría tener riesgos de estrés severo sobre el cultivo. Al observar el manejo del huerto durante el mes de diciembre el tiempo de riego (barras de color azul en la Figura 56) fue aplicado erróneamente, es decir tiempos de riego excesivos o insuficientes, mostrando un aumento del potencial xilemático (respuesta del frutal a un manejo de riego indebido). Para los meses posteriores (enero, febrero y marzo) se observa un tiempo de riego variable que va cumpliendo con las necesidades hídricas de la planta (valores de potencial xilemático entre $-0,5$ y $-1,0$ MPa). Esto demuestra que la medición del potencial xilemático es un buen indicador del estado hídrico de la planta, pues tiene una directa relación con el manejo de riego del huerto.

En resumen, el control y monitoreo del riego en base a sensores de planta, a diferencia de los sensores de humedad de suelo y de clima, permiten medir directamente el estado hídrico de las plantas. Son utilizados frecuentemente como control de las decisiones realizadas para la gestión y las prácticas de riego y verificar su efecto en el estado hídrico de los cultivos.

Control y monitoreo mediante el uso de imágenes satelitales y drones

El uso de imágenes satelitales y drones en la agricultura ha tenido un aumento importante en los últimos años. Este tipo de tecnologías poseen una gran ventaja ya que entrega una visión espacial y total del huerto. Información espacialmente distribuida puede ser utilizada en diferentes etapas de la vida de un huerto desde la sectorización inicial del sistema de riego de acuerdo con el suelo, modificaciones estratégicas de los sectores, aplicaciones espacialmente diferenciadas, adecuación de un equipo de riego ya instalado, determinación de la evapotranspiración o decidir en qué zona de huerto es pertinente instalar sensores de suelo y planta.

Imágenes satelitales.

Las imágenes de satélite son comúnmente utilizadas para analizar el estado hídrico de los huertos, estimar coeficientes de cultivo, contenido de agua de las hojas, especialmente permiten ver la variabilidad espacial que existe en un predio, pero también para identificar zonas homogéneas donde medir o tomar muestras. Para esto se utilizan diferentes índices de vegetación comúnmente utilizados por las plataformas que entregan servicios de programación de riego. A continuación, se muestran 4 índices de vegetación utilizados en riego:

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). El índice NDVI es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación y se determina relacionando la respuesta espectral de una superficie en el infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (R). Generalmente posee valores entre -1 y 1, donde 0 representa una superficie sin vegetación y 1 una vegetación saludable (valores negativos representan cuerpos de agua) (Figura 57). Valores de NDVI entre 0-0,33 podría representar una planta con problemas o algún tipo de deficiencia o representar periodos iniciales de desarrollo de un cultivo donde hay mayor presencia de suelo descubierto, entre 0,33-0,66 podría representar una planta medianamente sana y entre 0,66-1,0 podría representar una planta muy sana. En riego es común relacionar el coeficiente de cultivo (K_c) con el índice NDVI. Por ejemplo, la plataforma PLAS utiliza esta relación para determinar el K_c . La Figura 57 muestra un huerto de manzanos donde es posible ver la variabilidad espacial del NDVI. Valores altos de NDVI se muestran en color verde oscuro.

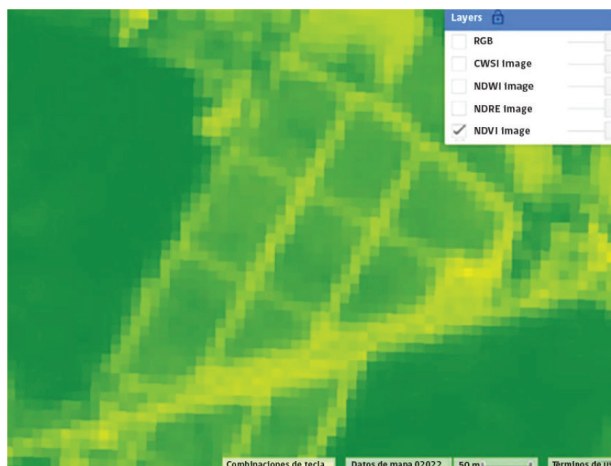


Figura 57. Variabilidad espacial del índice de vegetación: NDVI en un huerto de manzanos.

NDRE (Normalized Difference Red Edge). El índice NDRE se construye a partir de una banda específica del infrarrojo Cercano (conocida como “red edge” o borde rojo) y el rojo visible (Figura 58). Este índice es muy similar al más comúnmente usado NDVI. Sin embargo, el NDRE es más sensible que el NDVI durante el período de maduración del cultivo. El NDRE es un mejor indicador (también con valores entre -1 y 1) de las condiciones de las plantas que el NDVI para cultivos en temporada media y tardía de crecimiento y que ya han acumulado una gran cantidad de clorofila. Los valores negativos representan vegetación muerta, mientras que valores cercanos a cero podría relacionarse con estrés en la vegetación. Valores cercanos a uno indican un cultivo sano y con buena actividad fotosintética. El NDRE puede ser utilizado como un único punto de seguimiento, así como en combinación con el NDVI durante todo el período de crecimiento de la cobertura vegetal, desde la fecha de siembra hasta la cosecha. La Figura 58 muestra para el mismo huerto de manzanos el índice NDRE.

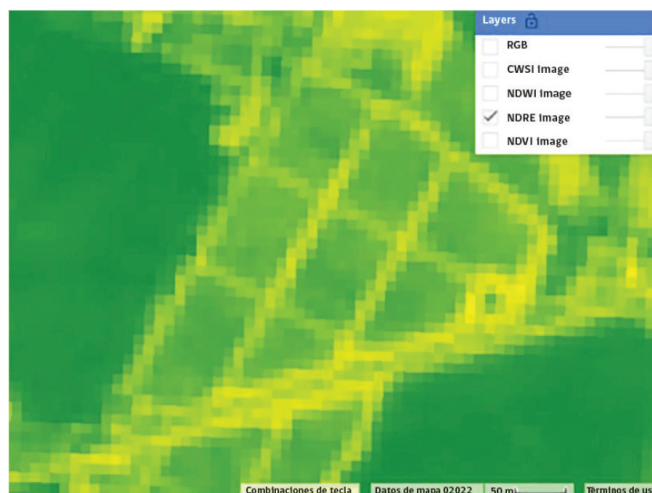


Figura 58. Variabilidad espacial del índice de vegetación: NDRE en un huerto de manzanos.

NDWI (Normalized Difference Water Index). El índice NDWI normalmente es utilizado para monitorear cambios en el contenido de agua de las hojas usando las bandas NIR y el infrarrojo cercano de onda corta (SWIR) con valores entre -1 y 1 (Figura 59). Valores negativos podrían indicar una sequía severa, mientras que valores cercanos a cero ($<0,3$) indican sequía moderada a severa. Valores cercanos a $1,0$ podrían indicar alto contenido de humedad.

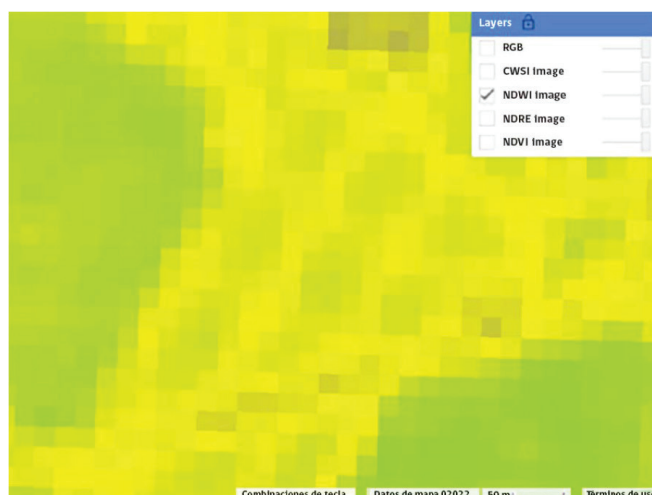


Figura 59. Variabilidad espacial del índice de vegetación: NDWI en un huerto de manzanos.

CWSI (Crop Water Stress Index). El índice CWSI es calculado como la suma de NDVI y NDWI tratando de unir la información de ambos índices. Los valores calculados se encuentran entre 0 a 1 (Figura 60). Valores cercanos a 0 indican bajo o sin nivel de estrés hídrico, mientras que valores cercanos a 1 indican un nivel estrés hídrico elevado. La Figura 60 muestra el índice CWSI. Este índice permite capturar en una misma área la variabilidad espacial existente.

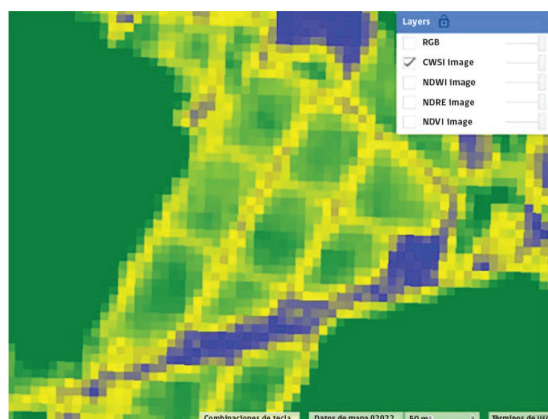


Figura 60. Variabilidad espacial del índice de vegetación: CWSI en un huerto de manzanos.

Plataforma Agrícola Satelital de Chile (PLAS).

La plataforma PLAS es una herramienta gratuita para la consulta periódica del coeficiente de cultivo (Kc) espacial y temporalmente distribuido usando el índice NDVI obtenido desde imágenes satelitales. Para ingresar a la plataforma se debe escribir en el buscador de "Google" - PLAS Chile - y hacer click en el primer link de la búsqueda o en su defecto ingresar a través del siguiente link: <https://www.agrisatwebgis.com/app/agrisat/login>. Ingresar usuario (plas) y contraseña (plas).

Para obtener valores de Kc desde la plataforma basta con buscar por nombre de la localidad (1 en Figura 61) o por coordenadas geográficas y posteriormente seleccionar el rango de fechas (2 en Figura 61) en la que se necesita conocer Kc. Posteriormente, seleccione el icono "it" (3 en Figura 61) y luego haga un click en la zona de interés de la imagen (4 en Figura 61). Los datos de Kc se desplegarán en un gráfico en la parte inferior de la pantalla (5 en Figura 61) y en formato de tabla al costado inferior derecho (6 en Figura 61). Adicionalmente el Kc se puede descargar en formato "Excel" haciendo click en el icono al costado inferior derecho (7 en Figura 61). Los diferentes colores mostrados por la imagen de Kc representan su variabilidad, es decir valores bajos de Kc denotados por el color café y valores altos de Kc denotados por el color verde.



Figura 61. Visualización del coeficiente de cultivo (Kc) en la plataforma PLAS.

Se observa de la Figura 61 que el Kc varía a lo largo de la temporada de riego (julio a septiembre para el ejemplo). Considerando la variación de color en el predio (área demarcada de color azul en la Figura 61), con esta herramienta PLAS se puede obtener un Kc por sector de riego, lo que podría beneficiar en un manejo de riego diferenciado en los sectores del campo (acorde a la sectorización de riego) para mejorar el uso eficiente del agua.

Imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados (UAVs o drones).

Actualmente utilizar imágenes capturadas desde drones se ha vuelto popular. Los drones pueden ser de ala fija o móvil. Las imágenes que puede capturar un dron dependerán de la cámara o sensor que se encuentre a bordo. Para el monitoreo de riego usando un dron los sensores comúnmente utilizados son: termales y/o multiespectrales. Estos últimos se han masificado principalmente en la fruticultura. Las imágenes de alta resolución tomadas por un dron usando sensores multiespectrales son utilizadas para obtener índices de vegetación, índices de humedad de suelo, índices fitosanitarios, demanda de agua, entre otros. Por ejemplo, el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) podría relacionarse con la demanda de agua y/o coeficiente de cultivo (Kc).

La Figura 62 muestra un huerto de cerezos con el NDVI calculado desde una imagen capturada por un dron. Se observa de la Figura 62 que el NDVI promedio del huerto es 0,55 eliminando los pixeles que involucran el suelo, lo que indica que la actividad fotosintética del cerezo se encuentra disminuida posiblemente producto de una menor tasa de reposición de agua.

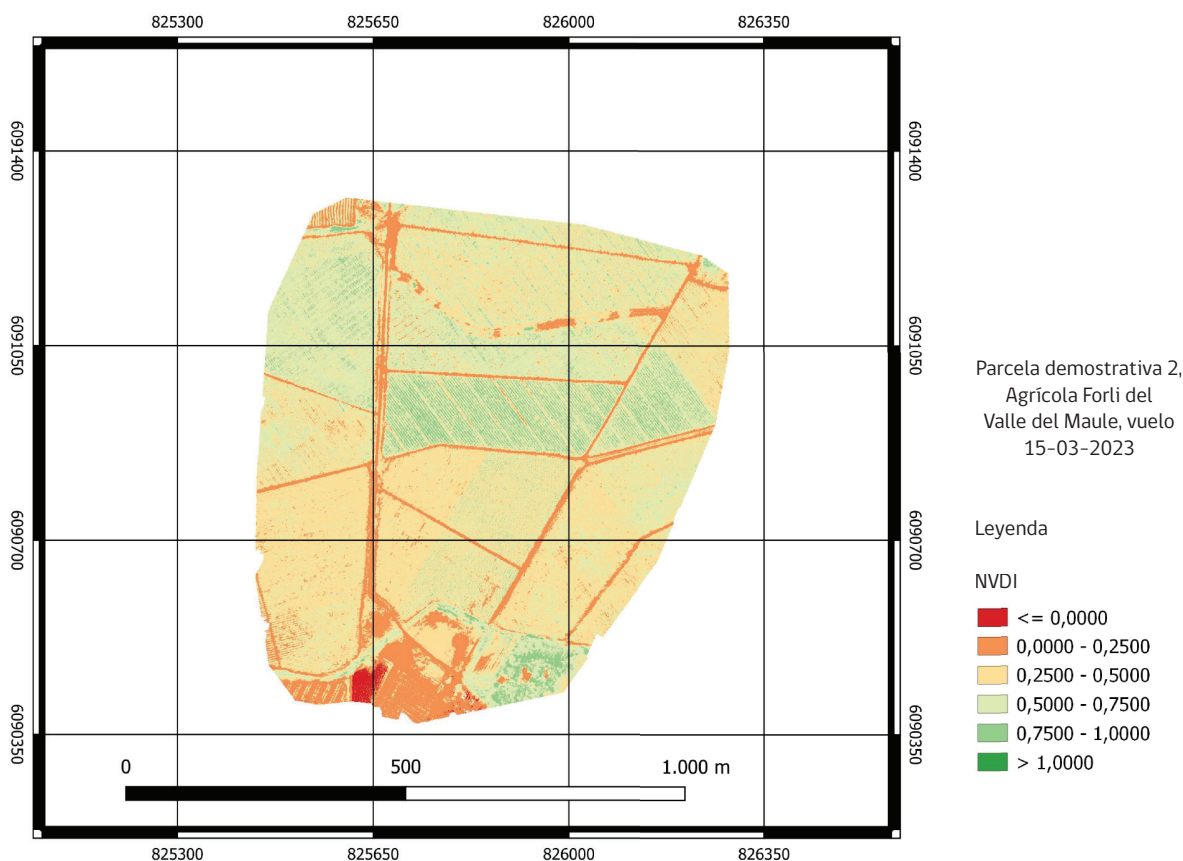


Figura 62. Índice de vegetación de diferenciada normalizada (NDVI) capturada por un dron en un huerto de cerezos.

Imágenes capturadas por UAVs pueden ser también utilizadas para generar un modelo tridimensional del huerto (Figura 63). Los modelos en 3 dimensiones (3D) tienen utilidad para el manejo agronómico y de riego del campo. Algunas de las ventajas que estos poseen son:

- ✓ Facilidad para identificar zonas del huerto que tienen problema de crecimiento (canopias menos vigorosas).
- ✓ Identificación de zonas húmedas de riego principalmente en la primera mitad de la temporada.
- ✓ Monitoreo de vigorosidad del cultivo.
- ✓ Cuantificación de la altura de la planta, relevante para obtener la demanda de agua con modelos de balance de energía superficial; entre otros.



Figura 63. Modelo en tres dimensiones (3D) RGB de un huerto de manzanos en Linares, región del Maule.

En conclusión, el control y monitoreo utilizando imágenes de satélite y de sistemas UAV's son una herramienta útil que tiene la principal ventaja de mostrar la variabilidad espacial del huerto. Normalmente en las imágenes se analizan índices de vegetación como el NDVI que se relaciona en general muy bien con el K_c para determinar demandas de riego. Son utilizados frecuentemente también para identificar áreas homogéneas del huerto, para identificar áreas representativas para la instalación de sensores y/o la toma de muestras del huerto.

The background of the entire page is a close-up photograph of green leaves and several round, green tomatoes. The lighting is bright, creating a high-contrast, slightly blurred effect in some areas, emphasizing the texture of the leaves and the smooth surface of the tomatoes.

CAPÍTULO 5

Beneficios económicos y productivos de la programación y control del riego tecnificado.

Programa
Transferencia tecnológica en programación
y control de riego tecnificado.

Costos de implementación de tecnologías para la programación y control del riego

Uno de los principales criterios para invertir en tecnologías para la programación y control de riego, tanto en herramientas manuales como en sistemas de telemetría (recopilación y transmisión de información de forma inalámbrica), son los costos de inversión y operación que ellos tienen.

En este sentido, en el pasado, el elevado costo de las soluciones ofertadas en el mercado contribuía a su menor adaptación y distribución, sin embargo, la masificación paulatina, la presencia de diferentes mecanismos de subsidio estatal y el creciente valor del agua en un contexto de escasez hídrica ha fomentado la adopción e implementación de nuevas tecnologías para la programación y control de riego. Esto ha permitido el levantamiento de más testimonios con experiencias y ha mejorado el acceso a los conocimientos necesarios para explotar al máximo las inversiones, generando un círculo virtuoso que ha ido cambiando poco a poco la cultura de riego en nuestro país.

Costos de inversión inicial.

El costo de implementar las nuevas tecnologías para la programación y control del riego dependerá del tipo de sensor a implementar. Algunos de ellos pueden ser: la estación agrometeorológica, sensores de humedad de suelo (FDR y TDR), el tensiómetro análogo y digital (Watermark®), el microtensiómetro FloraPulse® y/o el dendrómetro de fruto. A continuación, en la Tabla 12, se muestran los costos unitarios de la implementación de estas tecnologías. Para más detalles de estos sensores, se sugiere consultar el Capítulo 3.

Tabla 12. Costos referenciales para la compra de tecnologías de programación y control de riego.

Instrumento	Costo unitario (UF)*
1 estación agrometeorológica	34
1 sensor de humedad tipo sonda FDR	68
1 tensiómetro análogo	6
1 sensor de humedad tipo TDR + registrador de datos	35
1 microtensiómetro FloraPulse®	66
1 Watermark® + registrador de datos	22
1 dendrómetro (instalado en fruto)	51

*Los valores son referenciales (no incluyen IVA ni costos de telemetría) y pueden variar de acuerdo con el proveedor. 1 UF = \$36.191.

El uso de nuevas tecnologías para la programación y control de riego puede aportar beneficios y desafíos futuros para los agricultores. Dentro de los beneficios se puede mencionar:

- ✓ **Aumento de los resultados económicos:** puede ayudar a los agricultores a tomar mejores decisiones, optimizar sus operaciones, generar ahorros y aumentar la productividad, lo que lleva a mayores ganancias y un sector agrícola más sostenible.
- ✓ **Sostenibilidad ambiental:** puede ayudar a los agricultores a reducir su huella ambiental, optimizando el uso de recursos, reduciendo los impactos negativos y los residuos y utilizando técnicas agrícolas de precisión.
- ✓ **Competitividad de la industria:** puede ayudar al sector agrícola a mantenerse competitivo en el mercado nacional e internacional no sólo con un aumento productivo, sino que también mediante el aumento de la calidad de la fruta.
- ✓ **Mejora de las condiciones de trabajo:** las tecnologías pueden ayudar a reducir la carga de trabajo física y mental de los agricultores.
- ✓ **Mayor transparencia a lo largo de la cadena de suministro:** puede ayudar a mejorar la trazabilidad y la transparencia de los productos agrícolas, permitiendo a los consumidores tomar decisiones más informadas.

Mientras que de los desafíos futuros se puede mencionar:

- ✓ **Conocimiento de beneficios limitados:** los agricultores pueden no ser conscientes de los beneficios potenciales del uso de tecnologías de monitoreo y control y pueden carecer de recursos necesarios para implementarlas.
- ✓ **Interoperabilidad del sistema:** Las diferentes plataformas digitales pueden no ser compatibles entre sí, lo que dificulta compartir datos e integrar diferentes aplicaciones.
- ✓ **Brechas de competencia:** los agricultores pueden carecer de las capacidades digitales necesarias para beneficiarse plenamente de las tecnologías.

Costos anuales de implementación, capacitación y uso de la tecnología.

Los productos de telemetría se comunican entre el hardware de riego en el campo y el software en el computador, tablet o smartphone del productor. La telemetría proporciona una gama de capacidades remotas que incluyen la supervisión y el control del sistema de riego (aspersión y goteo), bombas, caudalímetros, monitores de humedad del suelo, sensores meteorológicos, tranques de acumulación y motores eléctricos.

En términos generales, un sistema exclusivamente de telemetría (Figura 64) será apropiado para aquellos huertos donde la limitante operativa para aumentar la eficiencia y eficacia de los riegos esté en la disponibilidad de información de las variables de humedad de suelo, estado hídrico de las plantas y condiciones agroclimáticas, principalmente, para tomar decisiones de cuándo y cuánto regar.



Figura 64. Equipo (nodo) de telemetría.

Para implementar la telemetría en las nuevas tecnologías mencionadas en la Tabla 12 es importante considerar el alcance espacial (superficie representativa) que se desea. Por ejemplo, en un huerto con suelos y clima homogéneos la cantidad de sensores y/o nodos de comunicación podrían ser menores en comparación con un huerto heterogéneo. Considerar la topografía, el suelo, el clima, las variedades y condiciones de las plantas, ayudará para determinar los costos de implementación de la telemetría.

Por ejemplo, si se considera un predio de 10 ha, homogéneo, con una vida útil de 5 años de la tecnología el costo total de instalación, capacitación y uso de la plataforma al invertir en un sensor de humedad de suelo tipo sonda FDR es de 2,09 UF/ha por año o en el tensiómetro Watermark® es de 1,30 UF/ha por año, mientras que para un microtensiómetro FloraPulse® es de 2,21 UF/ha por año (valores incluyen costos de la telemetría sin IVA). Éste último valor es similar si se considera un dendrómetro instalado en un fruto. Al considerar una estación agrometeorológica el costo total es de 0,12 UF/ha por año (suponiendo un predio de 200 ha). Sin embargo, si esto ocurriera en un predio heterogéneo los costos de UF/ha por año en cada caso aumentarían aproximadamente al doble.

Sin embargo, para que la programación y control de riego sean ejecutados de forma exitosa, en muchas ocasiones, dependerá de la acción dentro de la caseta o cabezal de riego. Tener la supervisión y/o control de éste es primordial para mejorar el manejo de riego. Esto podría aumentar las utilidades del huerto cuando la automatización y el control a distancia (telecontrol, ver Figura 65) se realizan de forma correcta.

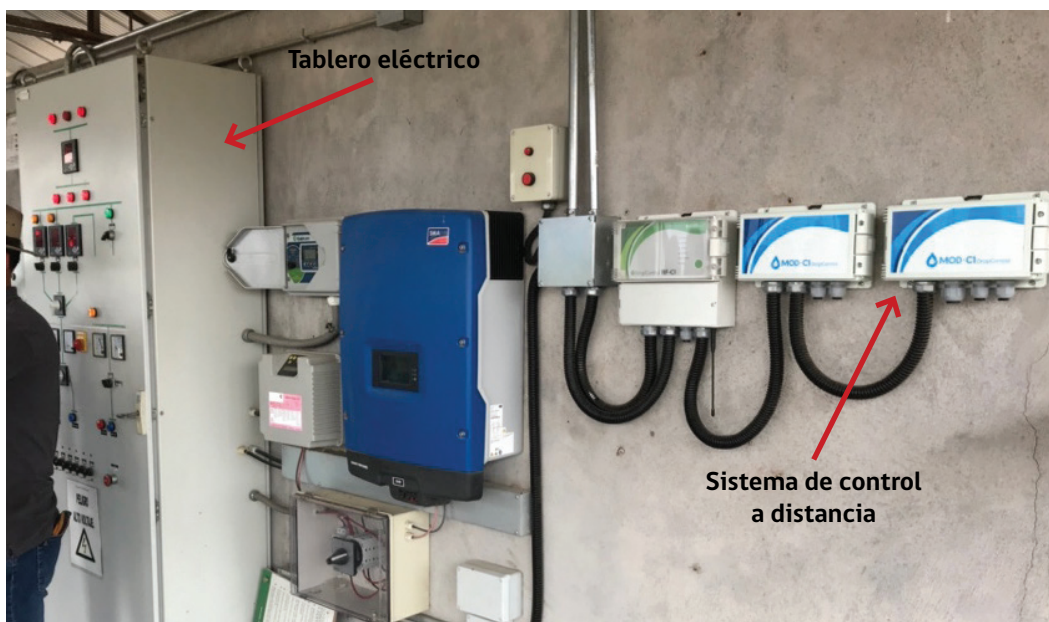


Figura 65. Componentes para el control a distancia de una caseta o cabezal de riego.

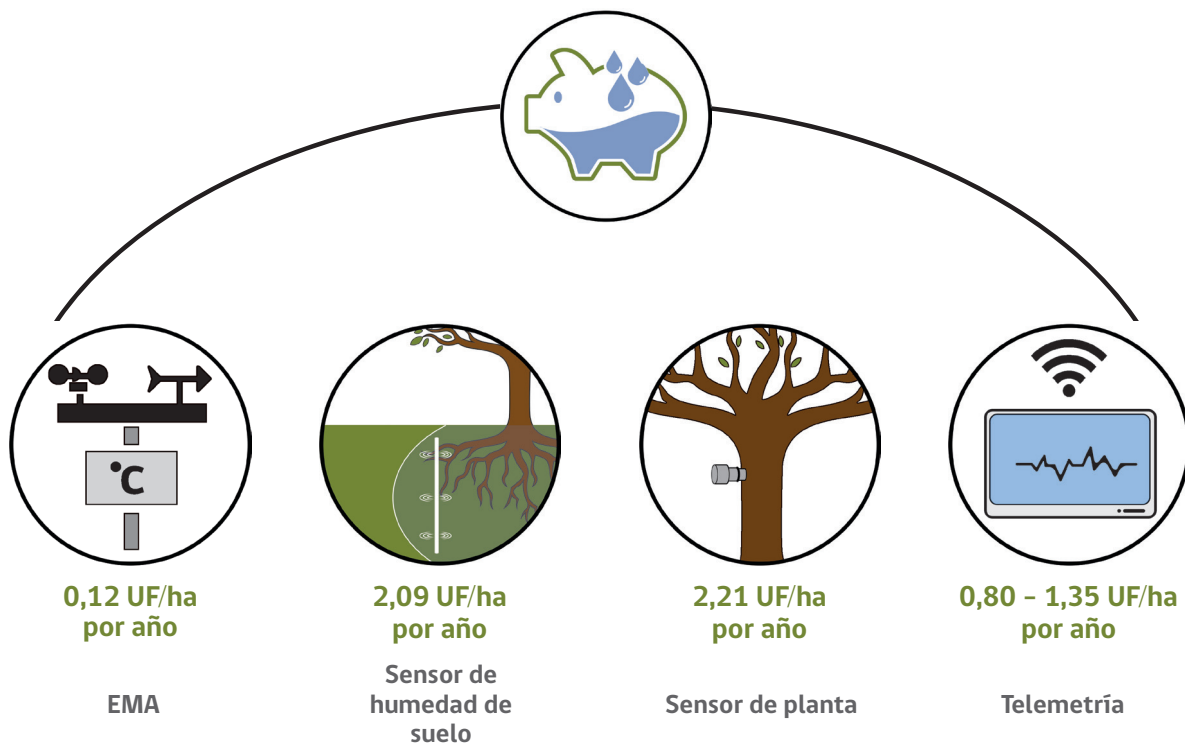
Si bien los equipos de riego deben estar diseñados en función de los tipos de suelos, cultivo y clima presentes en los predios y otros factores hidráulicos (ver el Capítulo 2), se podría tener un costo referencial de implementar telecontrol. Por ejemplo, si se considera un predio de 30 ha con un equipo de riego que posee 6 sectores con 2 válvulas eléctricas cada sector, el costo total de adquisición del equipo, instalación, capacitación y uso de la plataforma para el control a distancia es de 0,80 UF/ha por año o 1,35 UF/ha por año dependiendo si son válvulas eléctricas cableadas o inalámbricas, respectivamente.

Consideraciones para invertir en telemetría.

A continuación, se muestran algunas de las consideraciones generales de la inversión en telemetría y control a distancia:

- ✓ Independiente de que las ofertas comerciales incluyan paquetes con todos los implementos necesarios para la automatización de un sistema de riego, es importante entender que gran parte de la inversión se distribuye en aproximadamente: 45% en sensores, 45% en equipos de telecomunicación y 10% en el uso del software y soporte informático.
- ✓ Los sensores son generalmente genéricos y se pueden conectar a diferentes nodos de telemetría de diferentes empresas prestadoras de servicios.
- ✓ Los nodos de telemetría suelen no ser compatibles entre empresas, lo cual debe ser un factor a tener en cuenta para realizar una inversión (el costo de cambiarse de proveedor será elevado).
- ✓ Se debe procurar entender claramente las condiciones de servicio de cada empresa. No confundir soporte informático con servicio técnico en terreno. Este último, por lo general, tiene un costo adicional (importancia de leer el manual de los equipos para poder realizar mantenciones básicas y solucionar problemas típicos).
- ✓ Averiguar con el proveedor de la tecnología, cuáles son los costos de los servicios técnicos.

En conclusión, los **costos anuales** de implementación, capacitación y uso de la tecnología para el monitoreo y control del riego se pueden resumir en:



Ahorros y beneficios directos de tecnologías de programación y control del riego

La programación del riego es la decisión de cuándo y cuánta agua aplicar al campo y, por lo tanto, tiene un efecto directo en la eficiencia del uso del agua. La aplicación eficiente del agua de riego requiere una comprensión de la dinámica del uso del agua por parte de las plantas, que tiene relación con el clima, las características del suelo y la fisiología de las plantas. La programación de riego eficiente consiste en aplicar el agua en el momento y cantidad adecuada para optimizar la producción y compensar los impactos ambientales adversos (por ejemplo, percolación de fertilizantes). Por otro lado, una mala programación del riego da como resultado un riego insuficiente o sobre riego, lo que afecta la eficiencia en el uso del agua y el costo asociado en energía de impulsión.

Los productores que no utilizan ninguna herramienta de programación de riego a menudo confían en su experiencia para programar el riego y normalmente aplican mayores cantidades de agua que las necesarias. Investigaciones recientes han demostrado que los productores que dependen de métodos tradicionales de programación, como el riego manual, basada en el tiempo y en el volumen, registran pérdidas de agua significativas.

Numerosos estudios se han realizado para validar distintas metodologías y tecnologías que ayudan a la programación del riego. La siguiente tabla presenta algunas experiencias internacionales recientes respecto al ahorro de agua que implica la aplicación de tecnologías para el monitoreo y/o programación del riego. En la Tabla 13 se destacan dos estrategias de monitoreo y control del riego: Monitoreo de la humedad del suelo y programación basada en el clima.

Tabla 13. Estrategias de monitoreo y control del riego.

Estrategia de seguimiento	Características	Ahorros de agua (%)	Referencia
Monitoreo de humedad del suelo	Vivero ornamental comercial regado con aspersor.	50	Wheeler et al. 2020
	Frutillas.	58,8	Guéry et al. 2017
	Producción de olivos regados por goteo.	17 a 25	Aziz et al. 2022
	Césped.	11 a 53	McCready et al. 2009
	Riego en tomate y pimentón.	34 a 60	Dukes et al. 2007
	Producción de maíz.	34 a 32	Irmak et al. 2012
Programación basada en el clima	Plantación de melón en invernadero.	30	Abioye et al. 2021
	✓ Aplicación para programación basada en demanda de agua. ✓ Aplicado en cultivos anuales (maíz, cebolla, ajo, melón y papa).	16	Domínguez et al. 2023
	Trigo.	25,7	Abi Saab et al. 2019
	Césped.	25 a 63	McCready et al. 2009

En el caso de Chile, se han llevado a cabo algunas investigaciones que demuestran la efectividad del uso de este tipo de tecnologías. Un estudio desarrollado por investigadores de la Universidad de Chile en la región de O'Higgins el año 2021, evaluó en 40 productores de palta y cítricos, clasificados como agricultores pertenecientes a pequeña agricultura, un paquete tecnológico para la toma de decisiones en riego que incluía sensores de humedad de suelos FDR y estaciones meteorológicas (ambos descritos en el Capítulo 3).. Los resultados del estudio demostraron un ahorro de agua de un 28 hasta un 40%. Por otra parte, se produjo un aumento de la eficiencia del uso del agua entre un 23 a 30% (masa de producción por volumen de agua utilizado), una reducción del consumo eléctrico de entre un 17 a un 23% y un aumento económico del uso de agua de entre un 22 a 35% con respecto a la situación ante proyecto.

En otro estudio llevado a cabo por la Universidad de Chile el año 2014, en las regiones de Atacama y O'Higgins, en cultivos de uva de mesa, olivos, arándanos, cerezos, ciruelos, durazneros, frutillas, kiwi, manzanos, naranjo y nogales, se realizó el monitoreo del suelo utilizando sensores TDR y sondas FDR, se realizaron controles del estado hídrico de la planta con bombas tipo Scholander y se utilizaron EMA para monitoreo del clima. Resultados demostraron que a través del uso de estas tecnologías se logró reducir el consumo de agua de riego entre un 20 a un 50%, con un ahorro de energía proporcionalmente similar valorizado entre 200 a 1000 US\$/ha por temporada. A su vez, en este mismo estudio, hubo productores que mencionaron haber realizado un menor uso de fertilizantes (entre 20 a 40%) debido a menores niveles de percolación profunda (sin embargo, los autores indican que esta situación debe ser validada de acuerdo con el comportamiento de las plantas a largo plazo). A su vez, el estudio determinó una mayor eficiencia monetaria de este recurso gracias al incremento de los rendimientos (por ejemplo en vid de mesa, variedad Red Globe, de 22.140 a 31.570 kg/ha para el 2008 y 2011, respectivamente) y calidad de la fruta (ej. 50, 30 y 20% a 70, 18 y 12% de fruta grande, mediana y chica).

Finalmente, un estudio llevado a cabo por la Universidad de Concepción utilizando tecnologías de monitoreo de humedad de suelo y estado de la planta, en dos huertos de manzanos ubicados en las comunas de Linares (región del Maule) y Negrete (región del Biobío), determinó un **ahorro de agua entre un 21 y un 28%**, con un **ahorro estacional de 1600 m³ por hectárea**, donde además se **augmentó la productividad del agua de riego entre 36% y 52%**.

A continuación, se muestra una serie de antecedentes sobre beneficios y ventajas de tecnologías para monitoreo y control del riego.

Estaciones meteorológicas	
Las estaciones meteorológicas proporcionan información climática para ayudar a estimar la evapotranspiración y las necesidades de agua de los cultivos. Las estimaciones de las necesidades de agua de los cultivos basadas en ET se generan combinando datos meteorológicos locales con información del sistema de cultivo. Se puede acceder a los datos ET locales desde diferentes fuentes, como sistemas de estaciones meteorológicas gestionados públicamente y dispositivos privados de seguimiento meteorológico in situ.	
Ventajas ✓ Reducir la mano de obra. ✓ Reducir los viajes. ✓ Reducir el desgaste del sistema. ✓ Aumentar los rendimientos. ✓ Conservar agua. ✓ Proporcionar tranquilidad.	Costos ✓ Datos de estaciones meteorológicas financiadas con fondos públicos: Gratis para el usuario. ✓ Estaciones meteorológicas en campo: 30 - 180 UF.

Continuación estaciones meteorológicas

Beneficios

- ✓ Proporciona una estimación del uso del agua de los cultivos para informar mejor la programación del riego.
- ✓ Datos de estaciones meteorológicas públicas disponibles de forma gratuita en algunas regiones.
- ✓ Puede usarse para ayudar a informar otras prácticas de gestión (por ejemplo, fumigación química y/o control de heladas).

Limitaciones

- ✓ La precisión de los datos depende de la ubicación, la calibración y el mantenimiento de la estación meteorológica, así como su proximidad al predio.
- ✓ Requiere una comprensión de cómo los datos de ET de referencia y los coeficientes de cultivo se relacionan con cultivos específicos.
- ✓ Requiere comprender cómo los datos de ET informan los programas de riego.

Más información:

Para obtener valores de ET: <https://agrometeorologia.cl/>

Para obtener valores de Kc: <https://www.agrisatwebgis.com/app/agrisat/login>

Herramientas de programación de riego (aplicaciones telefónicas, softwares de computador)

Descripción

Las herramientas de software de programación de riego son programas informáticos que permiten al agricultor ingresar los parámetros únicos de su parcela y conectarse a otros indicadores de monitoreo, como el clima local, datos de evapotranspiración (ET) y/o sondas de humedad del suelo y estado hídrico de las plantas. Algunos programadores de riego realizan un seguimiento del balance hídrico diario del suelo y de la necesidad de regar teniendo en cuenta todas las entradas de agua (riego y lluvia) y las pérdidas de agua (evapotranspiración, percolación profunda y/o escorrentía). Esto también se conoce como "balance hídrico".

Ventajas

- ✓ Reducir la mano de obra.
- ✓ Reducir los viajes.
- ✓ Reducir el desgaste del sistema.
- ✓ Aumentar los rendimientos.
- ✓ Conservar agua.
- ✓ Proporcionar tranquilidad.

Costos

- ✓ Herramientas universitarias financiadas con fondos públicos: gratuitas para el usuario.

Beneficios

- ✓ Proporciona una estimación del uso del agua de los cultivos para informar mejor la programación del riego.
- ✓ Las herramientas universitarias brindan una oportunidad sin costo para probar cómo las herramientas de programación del riego pueden respaldar la gestión hídrica del campo.
- ✓ Algunas herramientas de la industria privada son parte de plataformas integrales de gestión agrícola que también pueden ofrecer pronósticos meteorológicos, de rendimiento y de riego, gestión remota de sistemas de riego y/o prescripciones de riego de tasa variable (VRI).

Limitaciones

- ✓ Las redes de estaciones meteorológicas públicas no están disponibles en todas las áreas.
- ✓ Los datos precisos de la estación meteorológica para un campo en particular se ven afectados por la distancia a la estación más cercana y la ubicación, calibración y mantenimiento del equipo.
- ✓ Requiere la disponibilidad de coeficientes de cultivo apropiados (Kc) para representar con precisión el uso de agua para diferentes tipos de cultivos en diferentes etapas de crecimiento.
- ✓ Requiere una caracterización adecuada del tipo de suelo.
- ✓ Requiere estimación de la eficiencia de la aplicación de riego.

Más información:

Aplicación telefónica Coquimbo RiegaBien.

Aplicación telefónica Metropolitana RiegaBien.

Aplicación telefónica O'Higgins RiegaBien.

Todas disponibles en AppStore y Playstore.

Sensores de humedad de suelo

Descripción

Los sensores de humedad del suelo utilizan varios métodos indirectos para estimar los niveles de agua del suelo. Aunque no se debe esperar que el monitoreo de la humedad del suelo proporcione un alto grado de precisión y exactitud en todos los escenarios, los sensores de humedad aún pueden resultar una herramienta útil cuando se combinan con la retroalimentación de otras herramientas y métodos utilizados para evaluar la humedad del suelo y necesidades hídricas de los cultivos.

Ventajas

- ✓ Reducir la mano de obra.
- ✓ Reducir los viajes.
- ✓ Reducir el desgaste del sistema.
- ✓ Aumentar los rendimientos.
- ✓ Conservar agua.
- ✓ Proporcionar tranquilidad.

Costos

- ✓ 20 a 70 UF por sensor.
- ✓ Es posible que se apliquen cargos de telecomunicaciones o tarifas de suscripción para acceso a datos.

Beneficios

- ✓ Las estimaciones del agua disponible para las plantas en la zona de las raíces respaldan una mejor programación del riego.
- ✓ Mejoras tecnológicas recientes en el procesamiento y soporte de visualización de los datos facilita su uso.
- ✓ Las recientes mejoras tecnológicas en la capacidad de monitorear de forma remota y espacial (en todo el campo) la humedad del suelo aumenta la comodidad y acceso a los datos.
- ✓ Capacidad para integrar datos de humedad del suelo con algunas herramientas de programación de riego y sistemas de gestión remota.

Limitaciones

- ✓ Los desafíos para seleccionar, instalar y mantener correctamente los sensores pueden afectar la calidad y la precisión.
- ✓ Los desafíos para comprender e integrar correctamente los datos de humedad del suelo para la programación del riego pueden limitar el valor de la información.
- ✓ La precisión puede verse afectada por varios factores, entre ellos la temperatura, la salinidad, la textura del suelo y la selección de la(s) ubicación(es) adecuada(s) del sensor dentro del campo.
- ✓ Una mayor variación entre las condiciones del campo y del suelo puede requerir más sensores y mayor atención a la selección de las ubicaciones de los sensores. Esto podría aumentar el costo de implementación de la tecnología.

En base a los antecedentes expuestos una programación del riego mediante herramientas de monitoreo y control pueden lograr:



Ahorros de agua entre un 11% a un 60%.



Ahorros de energía entre 17% a 23%.



Aumento de productividad entre un 20% a 50%.

Finalmente, el grado en que la tecnología de riego puede beneficiar una operación dependerá de su capacidad para reducir gastos (ahorros de agua y energía principalmente), aumentar los ingresos (mejoras en calidad y cantidad de producción) y/o producir otro valor que justifique el costo de la tecnología. El hecho de comenzar con un sector pequeño y representativo del campo y expandirlo según la experiencia adquirida y el nivel de éxito, puede ser una buena estrategia para implementar con éxito una nueva tecnología de riego.

Relación agua – producción y sus beneficios

El agua constituye un recurso natural único, finito e indispensable para todo organismo viviente y para la gran parte de las actividades económicas y productivas de un huerto. Para lograr una agricultura productiva, se han estudiado diversas estrategias de manejo de los recursos hídricos, teniendo como objetivo principal minimizar la cantidad de agua utilizada y maximizar la eficiencia de su uso. La relación “Agua – Producción” o “Función de Producción” constituye un elemento de decisión importante en el análisis de la producción agrícola, y más aún cuando el agua es un factor limitante. Las funciones de producción permiten tomar decisiones en el manejo de los cultivos para lograr rendimientos óptimos con el agua disponible.

La programación del riego tiene una directa relación con la cantidad de agua aplicada y por consiguiente en la producción. Sin embargo, cada variedad y cultivo posee un potencial de rendimiento, el cual puede ser alcanzado cuando se aplica la cantidad de agua óptima. Tener un control del agua aplicada y relacionarlo con la productividad a diferentes escalas (cuartel, predio, variedad, especie), permite tomar mejores decisiones respecto del manejo del agua en el huerto.

La relación agua – producción, desde un punto de vista práctico, significa conocer el rendimiento de un cultivo o frutal con respecto al volumen de agua aplicado. Esta relación es lineal y se expresa, normalmente, en cantidad de producto por unidad de volumen de agua o viceversa. Esto significa que cuanto más ET (evapotranspiración), más rendimiento hasta que se alcance el límite de producción (Figura 66). La ET umbral es la cantidad de uso de agua necesaria para que crezca el cultivo hasta el segmento de producción máxima. A menudo, la función de producción de agua del cultivo se denomina curva de uso de agua del cultivo, que es la línea curva de la Figura 66. Esta línea incluye la cantidad de ET más agua adicional aplicada a un campo ya sea por lluvia o riego, pero que se perdió por escurrimiento, drenaje o evaporación. La curva de uso de agua representa la respuesta promedio a largo plazo del rendimiento de un cultivo en una ubicación específica.

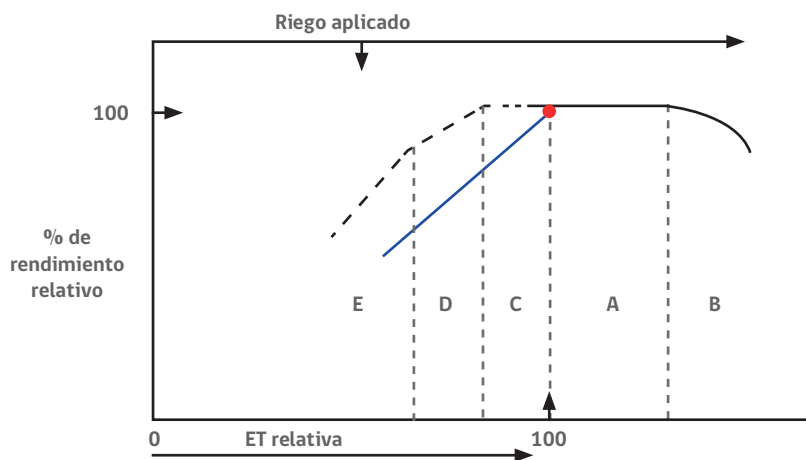


Figura 66. Relación generalizada entre rendimiento relativo, ETc relativa y agua de riego aplicada en árboles frutales. La línea punteada representa la respuesta esperada, la línea azul indica la respuesta típica de un cultivo anual.

Las funciones de producción de agua del cultivo son herramientas de planificación útiles, pero representan la respuesta a largo plazo de los cultivos a las condiciones de crecimiento. El uso de agua del cultivo varía según las condiciones climáticas estacionales (ver el Capítulo 1). Esto se observa en estudios a largo plazo sobre el uso de agua, por ejemplo, en manzanos en la región del Maule. El estudio tuvo dos tratamientos en la variedad Royal Gala, donde T1 representó el volumen de agua teórico requerido por la planta y T2 fue el manejo de agua realizado por el agricultor. Los resultados de dos temporadas analizadas mostraron que el promedio de agua aplicada en T1 fue 5600 m³/ha, mientras que para T2 fue 7400 m³/ha. En cuanto a los rendimientos promedios, en T1 se obtuvo 45,8 toneladas/ha, respectivamente. y en T2 43,8 toneladas/ha. La relación agua – producción del estudio o productividad del agua promedio fue 8,3 y 5,9 kg de fruta cosechada por m³ de agua aplicada en T1 y T2, respectivamente, lo que representa que T1 tuvo un 40% más de productividad por volumen de agua aplicado que T2. En la Tabla 14 se muestra un resumen de los resultados expuestos anteriormente.

Tabla 14. Agua aplicada, rendimiento y productividad del agua promedio en cultivo de manzanos en la región del Maule.

Tratamiento	Agua aplicada (m ³ /ha)	Rendimiento (toneladas/ha)	Productividad del agua (kg _{fruta} /m ³ _{agua})
T1	5600	45,8	8,3
T2	7400	43,8	5,9

Nota: T1 es el riego aplicado con el volumen teórico de agua requerido por la planta y T2 es el riego aplicado con el protocolo del agricultor.

La necesidad urgente de mejorar la eficiencia del uso del agua ha hecho determinar valores teóricos de productividad entre 7,9 y 11,9 kg de fruta/m³ para manzanos. Al comparar estos valores con los obtenidos en la Tabla 14 se observa que el T2 se encuentra en un 30% por debajo del límite inferior de productividad del agua teórica, mientras que el T1 alcanza el rango teórico esperado. Estos resultados muestran que realizar un programación y control del riego permitirán al agricultor obtener ahorros en aplicación de agua en el orden de un 20% a 30% con similares rendimientos y un aumento considerable de la productividad del agua.

En otros cultivos se han encontrado valores de productividad del agua promedio entre 3 a 6 kg de fruta cosechada por m³ de agua aplicada en cerezos, 2 a 5 kg de fruta cosechada por m³ de agua aplicada en platos y 3 a 6 kg de fruta cosechada por m³ de agua aplicada en cítricos. Sin embargo, la respuesta real de productividad dependerá en gran medida de factores como la variedad, el portainjerto, el tipo de suelo, las condiciones meteorológicas y manejo agronómico del huerto.

Beneficios del manejo eficiente del agua.

La gestión eficiente del agua en los huertos no sólo mejora el rendimiento de los cultivos, sino que también



Mayor rentabilidad. Un mayor rendimiento de los cultivos por unidad de agua aplicada se traduce directamente en una mayor rentabilidad para el agricultor. Mediante la optimización de las prácticas de riego, los productores pueden obtener mejores rendimientos de su inversión que pueden variar entre un 20 y 30%.



Ahorro de agua. Los sistemas y manejos de riego eficientes reducen la pérdida de agua, lo que se traduce en menores costos para las operaciones de los huertos. Esto es especialmente importante en regiones con escasez de agua o con normativas estrictas sobre el uso del agua. Con una programación y control de riego óptimo se puede ahorrar entre un 30 y 40% de agua.



Reducción del costo de los insumos. La conservación del agua mediante una gestión adecuada del riego puede reducir la necesidad de insumos adicionales, como fertilizantes y pesticidas. Esto se traduce en un ahorro de costos y promueve prácticas agrícolas sostenibles. Considerando la aplicación de fertilizantes mediante el riego (conocido como fertirriego), se podrían alcanzar ahorros de fertilizantes solubles en agua del orden de un 15% a 25%.



Reducción de la energía. En general los sistemas de riego utilizan sistemas de bombeo eléctricos. Por esta razón los ahorros de agua de 30-40% provocan una disminución del mismo rango de porcentaje en los costos asociados a los consumos energéticos.



Agricultura sostenible. La gestión eficiente del agua contribuye a la sostenibilidad a largo plazo de las explotaciones de frutales al reducir el impacto medioambiental asociado al uso excesivo de agua y a la escorrentía.

En resumen, comprender la respuesta del rendimiento de cultivos y frutales a la aplicación de agua es crucial para todo agricultor. Mediante la programación y el control de riego, los agricultores no sólo pueden mejorar el rendimiento de sus cultivos, sino también disfrutar de beneficios económicos que contribuyen al éxito general y a la sostenibilidad de sus explotaciones. Adaptar las estrategias de riego a las necesidades específicas de cada cultivo y controlar los niveles de humedad del suelo, el crecimiento del fruto y/o tronco y el potencial hídrico de la planta son pasos claves para alcanzar estos objetivos.

Calidad de la producción y sus beneficios

La calidad de los productos en la agricultura es un parámetro fundamental en el éxito o fracaso de una temporada. Una adecuada gestión que considere los efectos en aspectos de calidad y postcosecha permite tomar mejores decisiones respecto del manejo agronómico de los huertos. La calidad debe ser registrada según el tipo de cultivo, manejo, riego, entre otros, y asociarlos entre sí para tomar decisiones que permitan potenciar el producto. Normalmente, la calidad es evaluada al momento del embalaje, sin embargo, es fundamental tener un control de ella en el huerto para poder determinar unidades homogéneamente productivas.

En términos simples, la calidad de la fruta se expresa como la respuesta del cultivo al manejo agronómico y la programación de riego realizado en el huerto. Si bien, se tiende a pensar que la calidad de la fruta representa sólo el trabajo agronómico de la temporada actual, muchos de los resultados obtenidos son producto del trabajo realizado en años anteriores, como por ejemplo: manejo del riego, fertilización, poda, entre otros.

Los registros de calidad de la fruta serán determinados por cada productor en función del tipo de producto (fresco o seco), del destino y del mercado. Por ejemplo, en el caso de las cerezas, se realiza en base a la determinación de la variedad, el calibre, sólidos solubles, la firmeza, el color, acidez total, la sanidad, la condición para viaje largo, uniformidad y fruta consistente (Figura 67A). En el caso de las manzanas, los parámetros más habituales son color, firmeza, sólidos solubles y acidez (Figura 67B).

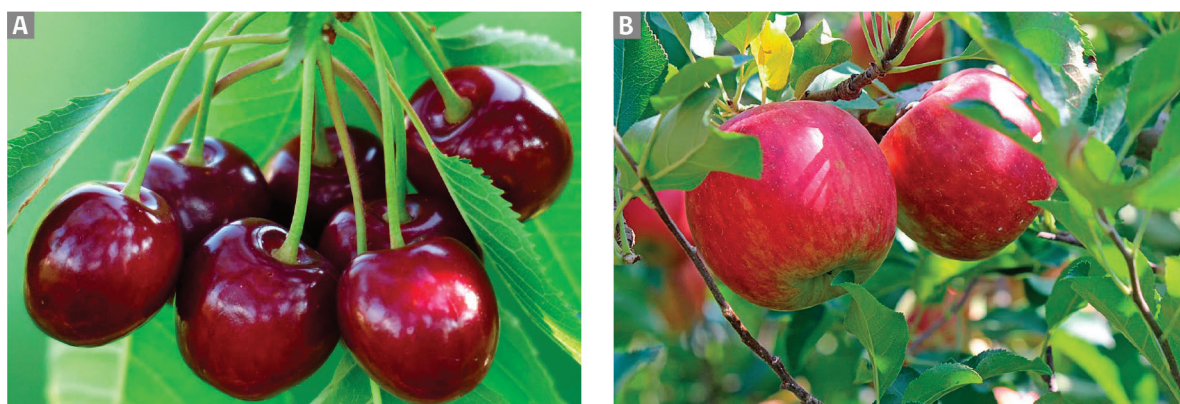


Figura 67. Calidad esperada de cerezas (A) y manzanas (B) a cosecha.

Para huertos de avellanos europeos, por ejemplo, los parámetros de calidad se registran para tener un control de las unidades productivas, como: peso de 1000 semillas, relación fruta/semilla, diámetro, índice de redondez, índice de pelabilidad, frutos vanos, apariencia de la semilla (arrugadas o deformes, semillas dobles) e incidencia de hongos.

Existen varios estudios que demuestran los efectos positivos de una buena programación de riego en la calidad de la fruta. En un estudio realizado en manzano, se evaluaron dos tratamientos de programación de riego durante dos temporadas en la variedad Royal Gala, donde T1 representó el volumen de agua teórico requerido por la planta y T2 fue el manejo de agua realizado con el criterio del agricultor. Considerando que en T1 se aplicó un 30% menos de agua comparado a T2 (ver Capítulo 5, relación agua-producción y sus beneficios para mayores detalles), los resultados mostraron que el peso promedio del fruto en T1 fue 184,7 g, mientras que en T2 fue 181,4 g. Es decir, en ambos tratamientos (T1 y T2) se obtuvieron similares pesos del fruto, pero con 30% menos de agua aplicada en T1. En cuanto al calibre promedio (diámetro ecuatorial) del fruto en T1 fue 7,1 cm y en T2 fue 7,0 cm. Para sólidos solubles y firmeza no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. En la Tabla 15 se muestra un resumen de los resultados expuestos anteriormente.

Tabla 15. Calidad de la fruta promedio en Royal Gala asociado al agua aplicada.

Tratamiento	Peso del fruto (g)	Diámetro ecuatorial (cm)	Agua aplicada (m ³ /ha)
T1	184,7	7,1	5600
T2	181,4	7,0	7400

Nota: T1 es el riego aplicado con el volumen teórico de agua requerido por la planta y T2 es el riego aplicado con el protocolo del agricultor.

Si bien, los resultados en la Tabla 15 muestran para ambos tratamientos (T1 y T2) diámetros ecuatoriales y pesos del fruto superiores a 6,5 cm (valor mínimo requerido por el mercado) y 90 g (peso mínimo requerido para exportación), respectivamente, se observa que al realizar una adecuada programación y control más precisos del riego (como en el tratamiento T1) permitirán al agricultor obtener ahorros de un 20% a 30% en la aplicación de agua con similares resultados de calidad.

Otro estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de estrategias de riego controlado en la producción y calidad del kiwi (*Actinidia deliciosa*) var. Hayward, en Chile. Durante los ciclos de producción de 2009 al 2012 se aplicaron cuatro periodos de restricción hídrica: 1) desde 30 días y hasta 10 días antes de la floración, 2) cuando el fruto alcanzó más de 60% del peso final, 3) cuando el fruto alcanzó más de 70% del peso final y 4) cuando el fruto alcanzó más de 80% del peso final. Los resultados de cada período de restricción fueron comparados con un tratamiento testigo con 100% de reposición de la evapotranspiración. Durante todo el estudio se midió humedad del suelo, estado hídrico de la planta, volúmenes de agua aplicados, desarrollo y uniformidad del fruto. Los resultados principales fueron: disminución del volumen de agua y costos asociados al bombeo (ahorro de energía) entre 24 y 40%, respecto al tratamiento testigo; las estrategias de riego controlado mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en calibre para los distintos años de estudio. Con estas estrategias se obtuvieron mejores uniformidades sin efectos en la productividad ($p > 0,05$).

Beneficios de la calidad de la producción.

Una programación y control de riego óptimo puede traducirse en importantes beneficios económicos para el agricultor. Al optimizar el uso eficiente del agua y el control del riego para obtener fruta de mayor calidad, el agricultor puede:



Aumentar el valor económico de la cosecha. Los productos de alta calidad alcanzan precios más altos en el mercado, lo que se traduce en mayores ingresos por unidad de cosecha.



Mitigar pérdidas. Un riego adecuado y constante ayuda a mantener y mejorar la calidad de la fruta y minimiza las pérdidas de cosecha debidas al estrés hídrico. La calidad de la fruta normalmente se ve reflejada en mayor cantidad de fruta exportable.



Mejores parámetros de calidad. Un riego adecuado y controlado en tiempos claves de desarrollo del fruto permite la obtención de mejores parámetros de calidad como mejor calibre, mayor uniformidad, mejores índices de forma, peso del fruto, color, sólidos solubles, entre otros.



Mejor vida en postcosecha. En general la fruta de alta calidad alcanza parámetros, como la firmeza del fruto, que definen una mayor vida en postcosecha de la fruta.



Mejorar la comercialización. La entrega constante de cosechas de alta calidad puede establecer su reputación como proveedor fiable, lo que conduce a una mayor demanda de sus productos en el mercado.

En resumen, la programación óptima del riego no consiste sólo en suministrar agua a los cultivos, sino también en optimizar la calidad de las cosechas y maximizar los beneficios económicos. Comprendiendo los beneficios económicos y de sustentabilidad de una correcta programación del riego, los agricultores pueden mejorar la calidad de sus cosechas y aumentar sus beneficios. Supervise y ajuste continuamente sus prácticas de riego para adaptarse a las condiciones cambiantes, y solicite orientación a expertos en manejo de riego y agrícola o a los servicios de extensión para mantenerse en la senda del éxito en la programación y monitoreo del riego.



Programa
Transferencia tecnológica
en programación y control de riego tecnificado.
VALLE DEL MAULE



**Mejor Riego
para Chile**

Comisión Nacional de Riego
Av. Libertador Bernardo O'Higgins #1449
Torre 1, piso 4 - Santiago Downtown
Santiago, Región Metropolitana
F: 2 2425 7990
www.cnr.gob.cl