

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

NODO TECNOLÓGICO DE RIEGO EN EL SECANO REGIÓN DE O'HIGGINS FASE II



Editores:
Alejandro Antúnez B.
Sofía Felmer E.

**NODO TECNOLÓGICO
DE RIEGO
EN EL SECANO
REGIÓN DE O'HIGGINS
FASE II**



Editores:
Alejandro Antúnez B.
Sofía Felmer E.

Litueche, Chile,
2009



Editores:

Alejandro Antúnez B.
Ingeniero Agrónomo Ph.D., INIA La Platina.
Sofía Felmer E.
Ingeniero Agrónomo, INIA Rayentué.

Autores:

Oscar Reckmann A.
Ingeniero Agrónomo M.Sc., INIA La Platina.
Juan Hirzel C.
Ingeniero Agrónomo M.Sc., Dr., INIA Quilamapu.
Alejandro Antúnez B.
Ingeniero Agrónomo Ph.D., INIA La Platina.
Sofía Felmer E.
Ingeniero Agrónomo. INIA Rayentué.
David Mora L.
Ingeniero Agrónomo. INIA Rayentué.

Director Responsable:

Nilo Covacevich
Director Regional INIA - Rayentué.

Cita bibliográfica correcta:

Antúnez B., A.; Felmer E., S. 2009. Boletín del Nodo de Riego en el Secano, Región de O'Higgins. Litueche, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N°190, 120p.

©2009, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Centro Regional de Investigación Rayentué. Avenida Salamanca s/n, km 105, Ruta 5 Sur, Los Choabinos, Rengo. Región de O'Higgins. Teléfono (56-72) 740830, Fax (56-72) 740834, Casilla postal 13, Rengo.

ISSN 0717-4829

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin la autorización del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ministerio de Agricultura.

Diseño y Diagramación: Jorge Berríos V.
Impresión: Salesianos Impresores S.A.

Cantidad de ejemplares: 300

Litueche, Chile, 2009.



PRÓLOGO

El Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), con el cofinanciamiento de INNOVA - CHILE de CORFO, a través del Centro Experimental Hidango, localizado en la Comuna de Litueche, Región de O'Higgins, ha desarrollado una serie de acciones de difusión y transferencia tecnológica en riego mediante el Nodo Tecnológico de Riego (Fase I y II), con el objetivo de conectar a pequeños y medianos agricultores del secano con tecnologías modernas e intensivas en el uso del agua y nutrientes y de bajo impacto ambiental.

En la Región de O'Higgins, en particular, existen dos zonas agroecológicas claramente definidas: riego y secano. En esta última, los sistemas productivos se desenvuelven sólo con el agua proveniente de las lluvias, contando también con cursos de agua superficiales escasos, agua subterránea de bajos caudales y suelos de alta erodabilidad, lo que limita la producción a cereales, leguminosas de grano y producción animal (ovina, bovina y caprina) sustentada con praderas naturales.

En el secano de la Región de O'Higgins, 424.000 ha corresponden a explotaciones agropecuarias y forestales, de las cuales 5.556 ha correspon-



den a explotaciones de secano, donde un amplio número de estas pertenecen a la Pequeña Agricultura Familiar Campesina (92% entre 0,5 ha y 150 ha).

En la primera fase del Nodo de Riego, se detectaron brechas entre la tecnología difundida y la existente en los predios de los beneficiarios del mismo. Es por esto, que la segunda fase del Nodo Tecnológico de Riego tiene por objetivo principal el estrechar las brechas tecnológicas detectadas en la primera etapa de la presente iniciativa, dirigiendo sus esfuerzos al trabajo con agricultores del secano innovadores en la producción de arándanos, paltos, olivos, almendros y frutillas, con riego tecnificado, que requieren de apoyo a su gestión productiva para insertarse en mercados más competitivos. En consecuencia, el impacto de este programa se relaciona con el aumento de la eficiencia de utilización del agua de riego y la aplicación de nutrientes, economizando energía, recurso hídrico y fertilizantes, permitiendo mejorar la condición y calidad de los productos y, por ende, la rentabilidad productiva.

De esta manera, el Nodo de Riego busca fomentar sistemas productivos más eficientes, intensivos, respetuosos del medio ambiente y capaces de sustentar la población de agricultores que habitan este agroecosistema.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Prólogo	3
Capítulo 1. Pozos de Captación de Aguas Subterráneas	13
1. Introducción	13
2. Acuíferos	15
2.1. Acuíferos libres	17
2.2. Acuíferos confinados	18
2.3. Acuíferos semiconfinados	18
2.4. Acuíferos colgados	19
3. Estratigrafía	19
4. Geomorfología	20
4.1. Depósitos fluviales	21
4.2. Depósitos gravitacionales	22
5. Propiedades físicas de los acuíferos	22
5.1. Permeabilidad	22
5.2. Espesor del acuífero	24
6. Estudios preliminares	24
7. Prospección	26
7.1. Métodos geofísicos superficiales	27
8. Diseño de Pozos de Captación de Aguas Subterráneas	29
8.1. Perforación	29
8.2. Entubación	29
8.3. Engravillado	30
8.4. Desarrollo	30



9. Profundidad del pozo _____	30
10. Diámetro del pozo _____	31
11. Entubación definitiva _____	34
12. Habilitación _____	35
13. Limpieza y desarrollo del pozo _____	43
14. Pruebas de bombeo _____	45
14.1. Prueba de caudal variable _____	45
14.2. Prueba de caudal constante _____	46

Capítulo 2.

Demanda de Agua por Parte de los Cultivos _____ 51

1. Evapotranspiración _____	51
2. Balance hídrico de un suelo regado _____	53
3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) _____	56
4. Evapotranspiración de cultivo (ET_c) _____	58
5. Estados de crecimiento del cultivo _____	60
6. Obtención de la curva de K_c _____	62
7. Unidades _____	63
8. Evaporación de bandeja _____	63
9. Determinación de los requerimientos de agua de los cultivos _____	67
9.1. Evapotranspiración de los cultivos (ET_c) _____	68
9.2. Demanda neta de agua de los cultivos (D_n) _____	68
9.3. Demanda bruta de agua de los cultivos (D_b) _____	68



Capítulo 3.

Eficiencia de Riego en Sistemas Localizados	73
1. Introducción	73
2. Eficiencia en el uso del agua de riego	74
2.1. Eficiencia de aplicación	79
2.2. Eficiencia de almacenamiento	83
2.3. Eficiencia de uniformidad	85

Capítulo 4.

Principios Básicos de Fertirrigación	91
1. Introducción	91
2. Los fertilizantes en el suelo	94
3. Fertilizantes utilizados en fertirrigación	98
4. Compatibilidad de los fertilizantes	100
5. El agua de riego y el fertirriego	103
6. Preparación de soluciones	105
6.1. Concentración de fertilizantes en el agua de riego	107
6.2. Inyección de fertilizantes	111
6.3. Cálculo de ácido a aplicar para neutralización	113

Anexos.

Anexo 1. Rango de Valores de Kc de cultivos	117
Anexo 2. Glosario de Términos	118



ÍNDICE DE CUADROS

Capítulo 1.

Cuadro 1. Resistividad eléctrica según tipo de material _____	28
Cuadro 2. Diámetro de la bomba y tubería en función del caudal de extracción _____	32
Cuadro 3. Valores de velocidad de entrada recomendados en función de la conductividad hidráulica K _____	38
Cuadro 4. Valores de velocidad crítica del flujo según tipo de material _____	40
Cuadro 5. Análisis granulométrico de una muestra de material acuífero _____	41
Cuadro 6. Prueba de bombeo a caudal variable. Datos de abatimiento y recuperación _____	48
Cuadro 7. Prueba de bombeo a caudal constante. Datos de abatimiento y recuperación _____	50

Capítulo 2.

Cuadro 8. Evapotranspiración potencial (ETp) promedio según climas en mm/día _____	58
Cuadro 9. Evapotranspiración potencial (ETp) para dos zonas características de cultivo de frutilla en Chile _____	58
Cuadro 10. Valores de Kc para frutilla bajo mulch en clima semiárido, según fases del cultivo ____	63
Cuadro 11. Coeficiente de bandeja tipo A según localización y condiciones ambientales: humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) _____	67



Capítulo 3.

Cuadro 12. Máxima superficie regable de frutillas por goteo, a partir de cierto caudal disponible, en la localidad de Litueche, Región de O'Higgins. _____	76
Cuadro 13. Eficiencia de aplicación del agua según el método de riego utilizado. _____	80
Cuadro 14. Clasificación de la Eficiencia de Uniformidad de acuerdo a diferentes intervalos de valores. _____	87

Capítulo 4.

Cuadro 15. Elementos esenciales para las plantas _____	95
Cuadro 16. Tolerancia de diversas especies vegetales a la salinidad y su relación con el rendimiento _____	97
Cuadro 17. Características de los principales fertilizantes usados en fertirrigación _____	99
Cuadro 18. Compatibilidad de los fertilizantes solubles utilizados en fertirriego _____	101
Cuadro 19. Rangos deseables de algunos parámetros y elementos en el agua de riego _____	104
Cuadro 20. Necesidades nutricionales de diversas especies hortícolas _____	106
Cuadro 21. Características técnicas de fertilizantes usados en fertirrigación _____	108



ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1.

Figura 1. Distribución del agua en el subsuelo, en una condición no saturada _____	16
Figura 2. Distribución del agua en el subsuelo, en una condición saturada _____	16
Figura 3. Dinámica de un sistema hídrico a nivel de cuenca _____	17
Figura 4. Estratigrafía del suelo _____	20
Figura 5. Formación típica de un valle fluvial y sus terrazas _____	21
Figura 6. Flujo de agua en sentido horizontal en muestras de suelo _____	23
Figura 7. Diseño de pozo previo a la perforación _____	31
Figura 8. Cono de abatimiento del acuífero durante el bombeo _____	33
Figura 9. Tubería utilizada en pozos profundos _____	34
Figura 10. Tipos de ranurado en tuberías _____	37
Figura 11. Ranurado en tubería del tipo horizontal y vertical _____	37
Figura 12. Diferencias de magnitud en el área abierta de tres tipos de rejilla _____	38
Figura 13. Tamices y curva de un análisis granulométrico _____	41
Figura 14. Filtro de gravas _____	42



Capítulo 2.

Figura 15. Evapotranspiración de cultivo _____	52
Figura 16. Transpiración de cultivo _____	53
Figura 17. Balance de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera _____	54
Figura 18. Distribución de la evapotranspiración, en transpiración y evaporación durante el período de crecimiento de un cultivo anual _____	56
Figura 19. Evapotranspiración potencial _____	57
Figura 20. Evapotranspiración real o del cultivo ____	59
Figura 21. Fases del cultivo según tipo de especies vegetales _____	60
Figura 22. Bandeja de evaporación tipo A _____	65

Capítulo 3.

Figura 23. Eficiencia de riego en riego por surco y por goteo _____	80
Figura 24. Mojamiento uniforme v/s Mojamiento desuniforme en un sistema de riego presurizado _____	81
Figura 25. Elección de emisores a muestrear para la determinación de la E_u _____	86

Capítulo 4.

Figura 25. Forma en que el pH afecta a la disponibilidad de los nutrientes minerales ____	96
Figura 26. Descripción de la composición de los fertilizantes _____	100



ÍNDICE DE FOTOS

Capítulo 2:

Foto 1. Fase 1 inicial en cultivo de frutilla	_____	61
Foto 2. Fase 2 de desarrollo en cultivo de frutilla	_____	61
Foto 3. Fase 3 de crecimiento en cultivo de frutilla	_____	61
Foto 4. Fase 4 de madurez en cultivo de frutilla	_____	61
Foto 5. Bandeja de evaporación	_____	64

Capítulo 3.

Foto 6. Medición de presión en la lateral por medio de un manómetro de glicerina	_____	77
Foto 7. Muestreo del gasto de emisores	_____	86
Foto 8. Registro del tiempo de medición	_____	87
Foto 9. Medición de caudales muestreados	_____	87



POZOS DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Oscar Reckmann A.

Ingeniero Agrónomo, M. Sc.

INIA La Plata.

1. INTRODUCCIÓN

Las singulares características de la geografía de nuestro país determinan que bajo el suelo de un sinnúmero de cuencas existan interesantes reservas de aguas subterráneas. En la actualidad este tipo de reservorios es cada día más explotado, ya sea a través de la inversión privada, o a través de políticas que incentivan la construcción de numerosas obras con fines de captación.

El agua es un recurso cada vez más escaso, por tanto es imperativo no descuidarlo, especialmente las reservas de aguas subterráneas. Su explotación se enfrenta hoy al desafío de hacerlo, por una parte económicamente rentable y por otra, la más importante, cuidando y conservando el recurso. Es claro que su extracción conlleva asociado un consumo energético, que será cada vez mayor en la medida que los niveles de agua de la explotación aumenten en profundidad.



La mejor forma de enfrentar la utilización de las aguas subterráneas de una manera racional es conocer el comportamiento y dinámica de éstas en condiciones naturales, y por otra parte, instruirse en las tecnologías de exploración y explotación del recurso.

En el diseño de sistemas de riego tecnificado es muy frecuente el uso de aguas subterráneas, la decisión de explorar y captar aguas del subsuelo normalmente queda exclusivamente en manos de los que prestan la asesoría en el sondeo y posterior perforación, existiendo un riesgo importante respecto a obtener caudales menores a los esperados. Una manera de reducir dicha incertidumbre es contar con algunos criterios técnicos elementales que permitan ofrecer diferentes puntos de vista antes de tomar una decisión. Del mismo modo, en el momento de construir el pozo, el no contar con el conocimiento básico en aspectos de diseño y construcción deja abierta la posibilidad a que exista un riesgo respecto a la calidad de la obra terminada y su eficiencia de operación. Nuevamente el hacer un esfuerzo por adquirir conocimientos y criterios técnicos básicos de diseño y construcción de pozos permite, por un lado, la interacción con los prestadores del servicio y técnicos especializados y por otro, la interpretación de los proyectos de diseño que se presenten. De este modo, se asegura la calidad de la obra y su vida útil.

Lo descrito en el presente capítulo pretende entregar información respecto a la exploración y explotación de aguas subterráneas, que les permita enfrentar el inicio de propuestas de diseño de riego con el uso de estas fuentes aplicando criterios técnicos, que favorezcan la toma de decisiones. La presente guía también aborda temas específicos de diseño y construcción de pozos, siendo su objetivo entregar criterios técnicos que faciliten la comprensión del proceso y la interpretación de datos, con el único



fin, una vez tomada la decisión de alumbrar aguas, de seleccionar a la mejor empresa de exploración y explotación de aguas subterráneas.

2. ACUÍFEROS

Un acuífero es aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros y/o grietas. Dentro de estas formaciones podemos encontrarnos con materiales muy variados como gravas de río, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas.

El suelo que se encuentra en la zona radicular es utilizado como un depósito para almacenar agua entre riegos, la que queda disponible para uso de las plantas. Análogamente, un acuífero es un almacén geológico a mayor profundidad, en el que se deposita el agua que puede ser bombeada posteriormente, lo cual se esquematiza en las **Figuras 1 y 2**. En el primer caso, el agua forma parte de un suelo que no está saturado (figura 1), mientras que en el segundo, los acuíferos se encuentran saturados o muy cerca de saturación (figura 2).

El material presente en un acuífero puede estar compuesto de diversos depósitos como arenas, gravas, limos y arcillas; o también por formaciones geológicas tales como roca fracturada y/o fisuras provocadas por fallas, o material calcáreo (caliza) con grietas producto de disolución.

Dependiendo del caudal y características del sustrato, las aguas subterráneas pueden generar por erosión auténticos canales subterráneos por donde circulan libremente.

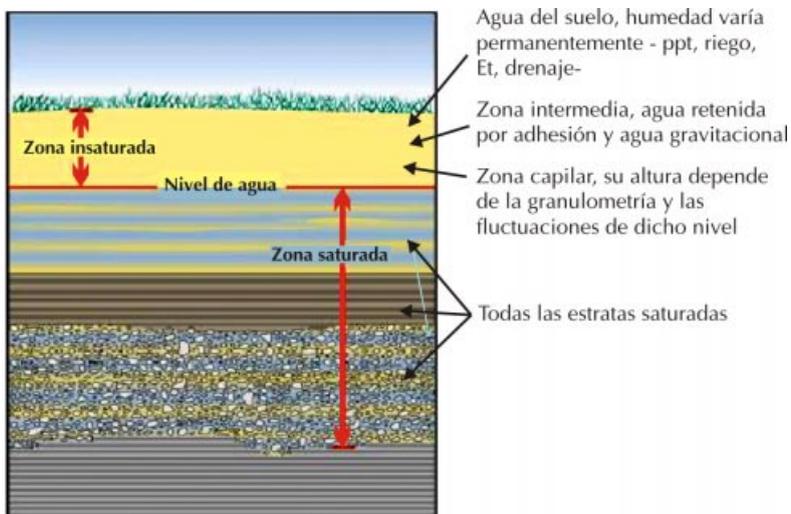


Figura 1. Distribución del agua en el subsuelo, en una condición no saturada.



Figura 2. Distribución del agua en el subsuelo, en una condición saturada.



En función de la presión hidrostática del agua encerrada en estos reservorios de agua es posible clasificar a los distintos tipos de acuíferos existentes. Por otro lado, reconocer el acuífero según su presión, se traduce en una circunstancia práctica muy útil que facilita el determinar el tipo de captaciones de agua subterránea. Entonces, de acuerdo a lo anterior tenemos (**Figura 3**):

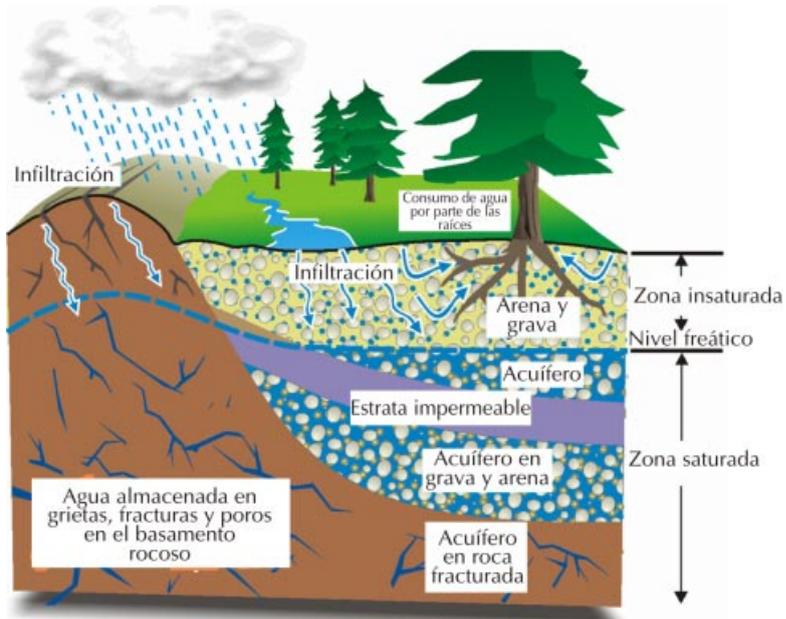


Figura 3. Dinámica de un sistema hídrico a nivel de cuenca

2.1. Acuíferos Libres

Son aquellos en los cuales existe una superficie libre de agua almacenada en ellos y que se encuentra a presión atmosférica. La superficie del agua corresponde al nivel freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no. En estos acuíferos, al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente, el agua alcanza un nivel que sería el mismo que tendría dentro de la forma-



ción geológica, es decir el nivel freático (nivel real) coincide con el nivel piezométrico (nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica).

2.2. Acuíferos Confinados

En este tipo de acuífero, el agua que contienen está sometida a cierta presión, superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los reservorios de la formación geológica, saturándola totalmente. Están sellados por materiales impermeables que no permiten que el agua ascienda hasta igualar su presión a la atmosférica. Por este motivo al perforar pozos que atraviesen el límite superior del material que constituye el acuífero, se observará que el nivel del agua asciende muy rápido hasta que se estabiliza en el nivel piezométrico. Podrán darse pozos surgentes si el nivel del agua queda por encima del nivel topográfico y pozos artesianos si el nivel se estabiliza por debajo de la cota del terreno. De esta manera, si imaginamos una serie de pozos atravesando un acuífero de este tipo, y unimos los niveles que alcanza el agua en cada uno, obtendríamos una superficie piezométrica que no coincide con el nivel freático que tenía el acuífero en estado natural.

2.3. Acuíferos Semiconfinados

Constituyen una variedad de los confinados, y se caracterizan por tener el techo (parte superior) y/o la base (parte inferior) sellado por materiales que no son totalmente impermeables, que corresponde a un material que permite una filtración vertical que alimenta muy lentamente al acuífero principal. En estos casos, habrá situaciones en los que la recarga podrá hacerse en ambos sentidos en función de la diferencia de potencial.



2.4. Acuíferos Colgados

Algunas veces se presenta cerca de la superficie una estrata de material más o menos impermeable por encima del nivel freático. El agua que se infiltra queda atrapada en esta capa para formar un volumen de agua almacenado, que normalmente tiene una extensión limitada sobre la zona saturada más próxima. Los acuíferos colgados son más comunes de lo que se pueda suponer, aunque quizá sólo ocupan unos pocos metros de espesor, o sólo se alimenten después de una recarga muy excepcional. No representan un volumen de almacenamiento de agua muy importante.

3. ESTRATIGRAFÍA

Los materiales en profundidad forman “estratos”, que corresponden a cuerpos de material que se depositan siguiendo la forma del relieve que cubren. A medida que un nuevo proceso depositacional cubre al anterior, los estratos van formando capas horizontales.

Lo que hay bajo una secuencia de depósitos no consolidados constituye lo que se conoce como “sustrato rocoso” o “roca madre”, generalmente mucho más antigua que los depósitos que la cubren (**Figura 4**).

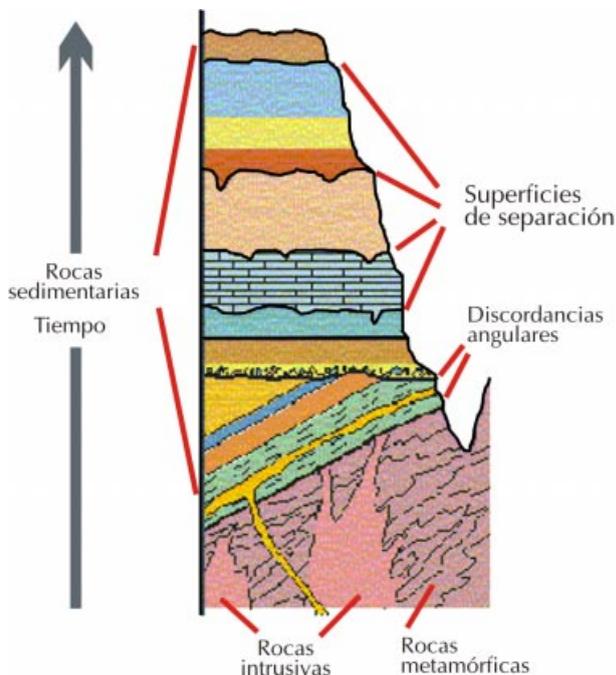


Figura 4. Estratigrafía del suelo.

4. GEOMORFOLOGÍA

En todos los procesos formadores de depósitos existe asociado el fenómeno de transporte. El cual, dependiendo con la energía que ocurra, producirá distintos tipos de depósitos; es decir, hay cambios en la forma y tamaño de los granos que son transportados: esfericidad y redondez son características determinantes del material como reservorio de agua. Se llama selección al grado de homogeneidad de los granos. En un depósito con buena selección los granos tienen tamaños similares.



4.1. Depósitos fluviales

Este tipo de depósito es muy común en el país, incluso en zonas de secano. En este caso, el agua que escurre por los ríos o esteros arrastra sedimentos que se depositan cuando disminuye la energía de transporte del río, formando depósitos fluviales. Las llanuras de inundación de los ríos forman depósitos aluviales; y los cambios en el nivel de base del río (glaciaciones), forman las terrazas fluviales, que corresponden a depósitos de la llanura aluvial que quedan sobre el nivel del río (**Figura 5**).

Los depósitos fluviales presentan una gradación de materiales depositados en sentido vertical, esto es: una base delgada con fragmentos gruesos con mala selección, mezclados con arcilla; una parte media, de mayor espesor, de gravas y arenas con buena selección; y en la parte superior limos y arcillas.

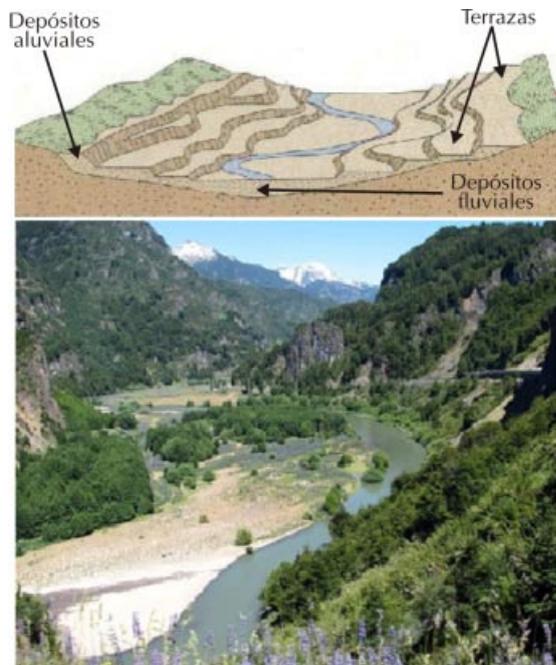


Figura 5. Formación típica de un valle fluvial y sus terrazas



4.2. Depósitos gravitacionales.

En las laderas de los cerros se encuentran los depósitos coluviales, con fragmentos angulosos, con poco arrastre. En general los fragmentos corresponden a rocas alteradas por lo que suelen tener abundante arcilla y limo.

5. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ACUÍFEROS

Con el fin de caracterizar cuantitativamente el flujo de agua a través de los estratos existentes en la zona saturada, se han definido algunos parámetros:

5.1. Permeabilidad

También denominada Conductividad Hidráulica (K). Se define como el volumen de agua que circula a través de una sección unitaria de suelo, en un tiempo unitario, bajo un gradiente hidráulico también unitario. La permeabilidad se mide en unidades de longitud por tiempo (m/día, cm/h). Este parámetro es afectado directamente por la textura del suelo y por la densidad y viscosidad del agua subterránea. El tipo de partículas, su arreglo y en último término la porosidad que generan, influye directamente en el movimiento del agua en el suelo, es decir, en los valores de K.

En la **Figura 6**, se puede observar tres muestras de perfil de suelo: uno que contiene solamente arena gruesa (a), otro que contiene arena fina (b), y otro que contiene una mezcla de ambas (c). En todos se indica la ruta que seguiría una partícula de agua junto



con el flujo en sentido horizontal; claramente se observa en la figura que el camino recorrido por la masa de agua en la muestra de arena fina (b), es más largo que en la muestra de arena gruesa (a). De esta manera podemos concluir a priori que en la muestra de suelo de arena gruesa el valor de K es mayor, asociando esta diferencia con un promedio de diámetro de partícula mayor. Sin embargo, en la naturaleza los suelos contienen partículas de diversos tamaños, y existe una influencia de la distribución del tamaño de éstas sobre los valores de K .

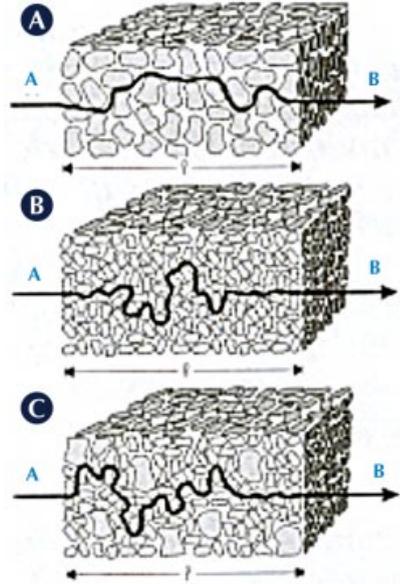


Figura 6. Flujo de agua en sentido horizontal en muestras de suelo.

En la figura anterior, se presenta una muestra de suelo con una mezcla de partículas de arena gruesa y de arena fina (c), además se indica la ruta de una partícula de agua con el flujo en sentido horizontal. Se puede observar en la figura que el tamaño de los poros de la muestra está fuertemente influenciado por las partículas de arena fina y, que las partículas de mayor tamaño actúan como barreras al flujo normal del agua en sentido horizontal. Determinando así, que el agua se vea forzada a tomar rutas más largas para circular a través de las partículas de la muestra. Si comparamos con las figuras anteriores, claramente se establece en la muestra de arena fina (b), que el valor de K es mayor, a pesar que el promedio de tamaño de granos en la mezcla es mayor.



5.2. Espesor del acuífero

Corresponde a la distancia que existe entre el estrato impermeable y el nivel freático en acuíferos libres, siendo variable, en función de los cambios del nivel freático, de pocos metros a decenas de metros de magnitud. En acuíferos confinados y semiconfinados, corresponde a la distancia que existe entre los estratos impermeables que lo encierran, en este caso el valor es constante y puede variar en órdenes de magnitud de unos pocos metros, a cientos o miles de metros (ver figura 1).

6. ESTUDIOS PRELIMINARES

Antes de tomar la decisión de construir alguna obra para la captación de aguas subterráneas es recomendable realizar estudios preliminares, con el fin de tener estimaciones de los recursos existentes.

Debe realizarse un recuento de todas las captaciones subterráneas existentes en la zona abarcada por las napas subterráneas que se trata de aprovechar, dentro del radio de influencia del pozo. En este proceso de recuento debe recopilarse información relacionada con ubicación geográfica, tipos y características de la obra, niveles estáticos de la napa y sus fluctuaciones, condiciones de explotación, capacidades máximas, estratigrafía y todo antecedente que se estime de interés. Mucha de esta información es posible encontrarla en las oficinas del Ministerio de Obras Públicas (MOP) de la región, específicamente en la Dirección General de Aguas (DGA), institución que además dispone de los derechos de agua subterránea concedidos.

Será necesario recopilar antecedentes de las captaciones subte-



rráneas existentes, así como conocer el régimen pluviométrico del sector. Este último se puede obtener a través de la información existente en el Instituto de Meteorología de Chile, algunas otras fuentes de estudios más específicos de la zona (Santibáñez, CIREN) o a través de información de estaciones pluviométricas locales.

Además, es recomendable realizar un estudio hidrogeológico de la zona donde se construirá el pozo, en el que se haga especial mención de las características de interés de los acuíferos existentes, tales como naturaleza de los rellenos, alimentaciones o recargas disponibles, extensión y dimensiones de los acuíferos, características de permeabilidad y almacenamiento de los mismos (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico, entre otros). Antecedentes de hidrogeología se encuentran en la DGA como también en el Servicio Nacional de Geología y Minería (organismo que confecciona “Cartas hidrogeológicas” de zonas de nuestro país). Para zonas de sequo de la VI y VII región actualmente existen las cartas de Rancagua y Talca respectivamente. Otra repartición que cuenta con antecedentes hidrogeológicos, es el Instituto de Recursos Hidráulicos (CIREN CORFO), donde se encuentran catastros de pozos confeccionados aproximadamente hasta el año 1970. El CIREN también cuenta con estudios para la determinación de Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (ZHH) en la mayoría de las regiones de nuestro país, cuya principal finalidad es definir y delimitar áreas geográficas en las cuales es posible la explotación de aguas subterráneas. Además, en cada ZHH se define un *pozo tipo* representativo, con sus atributos de profundidad, nivel estático, caudal posible de extraer y nivel dinámico.

También es recomendable la observación y estudio de cartas que reflejen la fisiografía y topografía del área en análisis. Mediante



este material es posible establecer claramente las hoyas hidrográficas de influencia en las cuencas, subcuencas y microcuencas; posibles recargas naturales y dirección del flujo de aguas subterráneas. Con este fin también es útil la cartografía desarrollada por el Instituto Geográfico Militar a escalas 1:25000 y 1:50000 con curvas de nivel cada 20 m, además de fotografías aéreas. Estas últimas también se obtienen en las dependencias del servicio aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea en Cerrillos, Región Metropolitana, donde existen fotografías en diversas escalas y que cubren virtualmente todo el país.

Si los antecedentes existentes no son suficientes, se deberá investigar, programar y ejecutar las actividades adicionales que sean necesarias, como investigaciones geológicas detalladas, pruebas de agotamiento e infiltración en pozos existentes y prospecciones de diferente índole, entre otras.

7. PROSPECCIÓN

Para la hidrología subterránea las características de los materiales geológicos relacionados con algunas propiedades específicas de los mismos, permiten identificar materiales o masas homogéneas que, correlacionadas con las características hidrodinámicas, aportan un buen conocimiento de la geología subterránea. Información imprescindible para la obtención de la geometría de los acuíferos y en general de las estructuras geológicas subterráneas.

En el estudio o prospección de aguas subterráneas encontramos por una parte, los métodos denominados superficiales que no requieren de pozos o perforaciones para su implementación, y por otra, aquellos que se aplican en perforaciones ya existentes o



realizadas con dicho fin, conocidos como registros geofísicos, siendo en general estos últimos más costosos.

7.1. Métodos geofísicos superficiales

A pesar de que existe una serie de este tipo de métodos prospectivos con el fin de ubicar aguas subterráneas para su explotación, dos son los de mayor importancia:

Método sísmico: este método se basa en la velocidad de transmisión de las ondas elásticas en los diferentes tipos de materiales del subsuelo como respuestas a la inducción de vibraciones artificiales por sistemas mecánicos. Las vibraciones se detectan por medio de sismógrafos en varias direcciones y distancias desde la fuente de energía, y se gravan en papel fotográfico o cintas magnéticas para su posterior interpretación.

La velocidad de propagación de la onda longitudinal, única de interés con el fin de la explotación de aguas subterráneas, depende del grado de compactación y del estado de consolidación del material o formación geológica.

La limitación principal de este método, es que no se puede obtener información de capas que se encuentran bajo estratos de material denso (basaltos, calizas compactas), donde la velocidad de propagación es mayor en la superficie que en la profundidad.

Método eléctrico: su característica principal es que permite determinar la resistividad o conductividad eléctrica de las formaciones geológicas expuestas. Las principales propiedades físicas de las rocas o formaciones que intervienen en las medidas eléctricas de este método son: resistividad (r), constante dieléctrica (e), permeabilidad magnética (m) y propiedades electroquímicas.



Sin duda, la propiedad de mayor importancia desde el punto de vista de la prospección es la resistividad, que se define como: la resistencia que opone un cubo de ancho unitario al paso de una corriente eléctrica de 1 ampere, que circula en sentido perpendicular a sus dos caras, entre las cuales existe una diferencia de potencial (voltaje) de 1 volt, siendo la unidad de medida de la resistividad el ohm-metro.

Los factores de mayor influencia en el valor de la resistividad de las rocas son la constitución mineralógica, el grado de saturación y calidad del agua que la satura, la porosidad, la edad geológica y el grado de compactación. Otros factores que también influyen son la temperatura, presión y humedad (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Resistividad eléctrica según tipo de material.

Tipo de medio	Ohms-metro	Tipo de medio	Ohms-metro
Granito saturado	20-100	Caliza y arenisca	50-3000
Caliza saturada	50-20	Pizarra	50-300
Agua salina	1-10	Rocas metamórficas	100-10000
Agua potable	50-300	Grava	100-10000
Agua de mar	< 0,2	Arena	130-1000
Agua destilada	> 500	Limo	30-500
Arcilla	10-100		

Con la información de las resistividades obtenidas se confeccionan perfiles de suelos representativos de la geometría y características de las formaciones atravesadas por los sondeos.



8. DISEÑO DE POZOS DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El diseño de un pozo consiste en establecer todos los parámetros que definan claramente las características de construcción y de operación de la obra.

En el proceso de diseño y construcción de un pozo es necesario definir en forma detallada:

- Las condiciones geológicas de los distintos terrenos, una selección y manejo eficiente de la maquinaria utilizada en la perforación y desarrollo del pozo.
- Perforación
- Instalación de la tubería (Entubación)
- Engravillado
- Limpieza y desarrollo para asegurar una agua pura y estabilidad en el caudal

8.1. Perforación

Consiste en atravesar los estratos que componen el subsuelo, hasta la profundidad del proyecto, dejando un espacio interior libre que permita la posterior colocación de la entubación definitiva.

8.2. Entubación

Consiste en dejar el pozo con su tubería de revestimiento definitiva con cribas o rejillas en los tramos que enfrentan a los acuíferos.



8.3. Engravillado

El engravillado consiste en rellenar el espacio anular comprendido entre la perforación cilíndrica y la tubería de habilitación, con una gravilla lo mas uniforme posible, que permita la formación de un filtro que impida la incorporación de partículas al pozo durante el bombeo, consiguiéndose así un pozo mas limpio y una mayor vida útil del equipo de bombeo.

8.4. Desarrollo

Consiste en extraer los residuos de la perforación (lodos), estabilizar las formaciones en torno a las cribas, logrando un mejoramiento granulométrico de mayor tamaño a menor tamaño. Mejorar la productividad y prolongar la vida útil del pozo (**Figura 7**).

9. PROFUNDIDAD DEL POZO

Es un parámetro de diseño muy importante y generalmente es posible determinarlo con antecedentes de otros pozos en las cercanías del estudio o con estudios hidrogeológicos preliminares (CIREN, DGA, SERNAGEOMIN, etc.).

La profundidad será fijada inicialmente con base en los espesores, profundidades y rendimientos específicos de los acuíferos, tratando de cubrir la demanda o la necesidad para el uso que se pretende dar al agua. Es recomendable que si se trata de un acuífero que funciona como libre, la perforación llegue hasta el piso del mismo, para evitar efectos de penetración parcial. Por la misma razón, en acuíferos confinados se recomienda captar todo el espesor del acuífero, salvo que los espesores sean muy grandes o los caudales de extracción demandados sean pequeños para

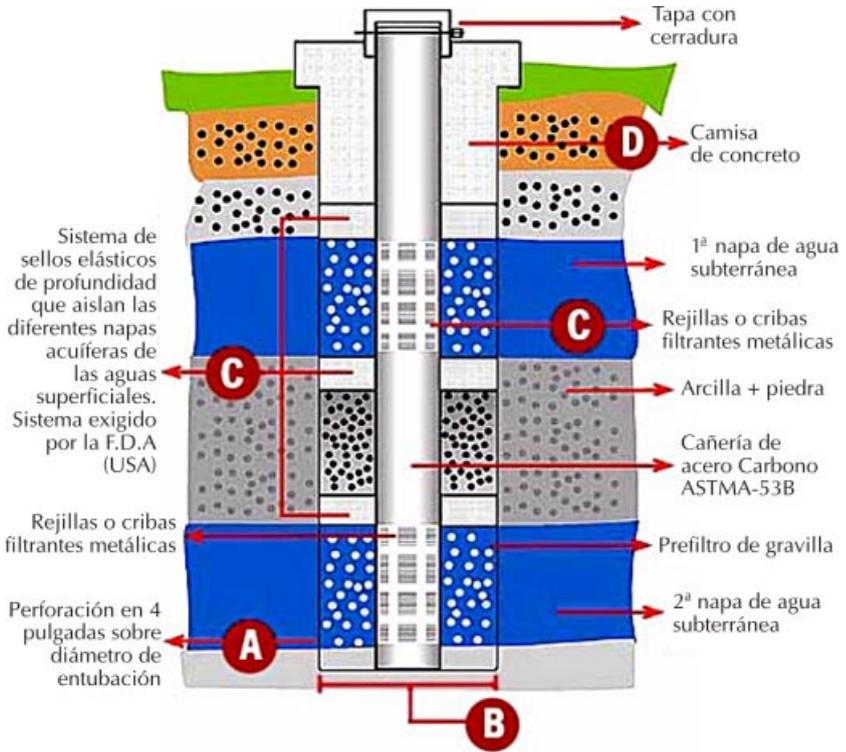


Figura 7. Diseño de pozo previo a la perforación

aceptar una solución de penetración parcial. Otra razón que fija la profundidad del pozo es la presencia de estratos que contengan agua de mala calidad.

10. DIÁMETRO DEL POZO

Para fijar el diámetro de la tubería influyen factores esencialmente hidráulicos. En general se distingue dos de estos factores en la tubería: uno que va desde la superficie hasta la profundidad donde irá instalada la bomba, y se denomina *cámara de bombeo*; y otro que se extiende hasta el *sistema de captación* (rejilla o tubo ranurado).



En la cámara de bombeo el diámetro recomendable para la tubería es el doble de la bomba, aunque este valor será función de la longitud de la cámara de bombeo, ya que a mayor profundidad el riesgo de tener desviaciones en la perforación aumenta, por lo que a mayor longitud es recomendable permitirse una mayor holgura. A su vez, el diámetro de la bomba esta en función de su punto de operación, esto es caudal y presión de operación requerida, valores que se definen durante el diseño del sistema de riego. En esta etapa el punto de operación se obtiene de manera tentativa, ya que se tiene una estimación de la superficie total a regar. El punto de operación de la bomba permite definir una marca y modelo, en función del modelo sus dimensiones, y finalmente su diámetro. A continuación y a modo de referencia, se presentan en el **Cuadro 2**, los valores de diámetros recomendados en función de caudales extraídos.

Cuadro 2. Diámetro de la bomba y tubería en función del caudal de extracción.

Diámetro Máx. Bomba (pulg)	Diámetro Mín. Tubería (pulg)	Caudal (L/s)
5	6	0 - 10
6	8	9 - 24
8	10	21 - 40
10	12	36 - 80
12	14	72 - 110
14	16	98 - 180

Fuente: Ex Departamento de Recursos Hidráulicos. CORFO.

Una vez definido el diámetro para la entubación, se puede determinar el diámetro de la tubería de perforación que se empleará en la construcción del pozo. El diámetro inicial de perforación debe determinarse teniendo en cuenta el diámetro definitivo de



entubación y la profundidad prevista para el pozo, considerando posibles cambios de diámetro a lo largo de ella.

Con relación a la longitud de la cámara de bombeo, ésta se calculará sumando a la profundidad del nivel estático el abatimiento esperado (**Figura 8**), que es a su vez función del caudal de extracción, más la sumergencia, entiéndase por sumergencia la profundidad definitiva a la que queda instalado el equipo de bombeo con respecto al nivel dinámico, y que es necesaria para un buen funcionamiento de la bomba.

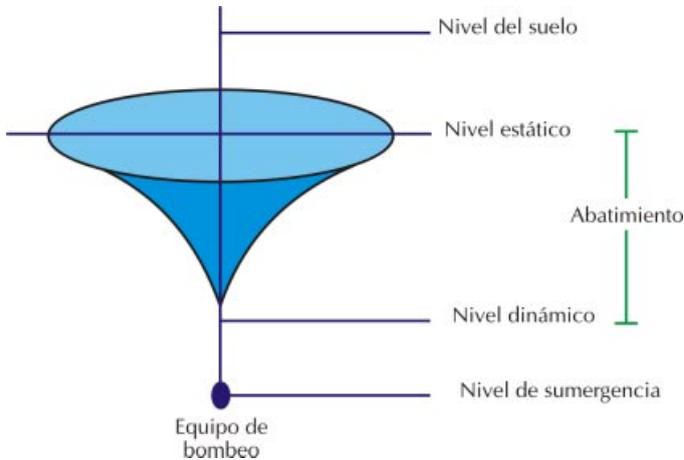


Figura 8. Cono de abatimiento del acuífero durante el bombeo.

El nivel estático se obtendrá del sondeo de los pozos cercanos al sitio donde se pretende realizar la perforación, el abatimiento debido al bombeo se obtendrá aplicando ecuaciones de hidráulica de pozos (responsabilidad de la empresa de perforación).

La sumergencia de la bomba se puede obtener de los fabricantes del equipo de bombeo. En general, se pueden considerar de unos 5 a 8 metros, dependiendo del caudal de extracción. Una insuficiencia del nivel de sumergencia puede resultar en un funciona-



miento sin agua (“en seco”) de partes de la bomba con el consiguiente calentamiento y daño de las piezas rozantes.

11. ENTUBACIÓN DEFINITIVA

La tubería definitiva del pozo debe ser capaz de resistir la presión provocada por los empujes laterales del terreno y la presión hidrostática de los acuíferos existentes, esto por posibles diferencias de nivel de aguas entre el interior y el exterior del pozo. La conducción de construcción de estas tuberías está basada en criterios que condicionan su comportamiento estructural e hidráulico, de manera que cumplan con las características de sostenimiento de las paredes del pozo y de la conducción hidráulica que conecta al acuífero con la superficie, y permita una adecuada instalación del equipo de bombeo.

Las tuberías que se utilizan para habilitar los pozos son de acero tipo YODER (**Figura 9**), con extremos para soldar. Se ajustan a las normas ASTM-53, ASTM-120 y API (las normas ASTM abarcan varios sectores clave, incluidos los productos de acero y hierro, productos de metal sin hierro, tecnología medioambiental y del agua, entre otros).



Figura 9. Tubería utilizada en pozos profundos.



En el caso de la tubería de PVC, los estándares exigidos para su uso en pozos profundos son superiores a los comúnmente utilizados en sistemas de riego. Se recomienda el PVC clase 11, 12 y 21 que tolera presiones entre 572 y 3.000 Kpa. Estos estándares no se encuentran en el comercio local por lo que no se aconseja reemplazar el PVC que normalmente se utiliza en conducciones de riego por su uso en tuberías de pozos profundos ya que existe el riesgo de que colapse por las diferencias de presión que se producen en las formaciones acuíferas.

Las entubaciones definitivas deberán quedar verticales y alineadas. Ninguna tubería, en cuyo interior haya de colocarse un equipo de bombeo, deberá desviarse de la vertical más de 7,5 cm cada 30 m para los tubos de hasta 2" de diámetro nominal; más de 10 cm para diámetros entre 8" y 12"; ni más de 15 cm para diámetros mayores de 12".

12. HABILITACIÓN

El proyecto de pozo también contempla el dimensionamiento de los componentes de la zona de captación y los procesos de limpieza de la obra, conocido como habilitación.

Zona de captación: la zona de captación se define como el sector vivo y activo de la obra, y corresponde a aquel sector del revestimiento que enfrenta la zona filtrante por donde se produce el ingreso del agua. Este sistema permite el ingreso del agua limpia al pozo, exenta de sedimentos, y debe cumplir con exigencias de orden hidráulico, de manera que el pozo sea eficiente; es decir, que su *caudal específico* (L/s por metro de abatimiento) sea el mayor posible.



La zona de captación está conformada por dos partes: la rejilla o tubería ranurada y el filtro de gravas. Ambos elementos tienen por objeto permitir el acceso de agua libre de materiales finos en suspensión, impidiendo además derrumbes en la perforación. Los referidos elementos deben ser diseñados con el fin de generar el mínimo de pérdidas de carga hidráulica en el pozo.

Rejilla o tubería ranurada: las pérdidas de carga ocurridas en los filtros y rejilla están directamente relacionadas con el cuadrado de la velocidad del flujo de ingreso al pozo. Para un caudal conocido, la velocidad del flujo depende del área, la que se conoce como la superficie o área abierta de la rejilla; la misma que está dada por el número de aberturas o ranuras en la tubería y por la longitud y ancho de estas. A mayor área abierta de la rejilla, mayor velocidad de flujo, y en consecuencia menores pérdidas de carga, con el resto de los factores constantes.

Existe una variedad de alternativas, tanto para tubería ranurada (orificios circulares, orificios rectangulares, ranuras verticales y ranuras horizontales), como para rejilla propiamente tal (rejilla de persianas o celosía y rejilla Johnson) (**Figura 10**). En cualquier caso el fundamento hidráulico para una eficiente operación es el mismo, a mayor área abierta de la rejilla menor será la altura de succión. En la figura 10, se comparan áreas abiertas de rejilla para tres tipos de filtros, y en ella se puede observar que la rejilla tipo Johnson posee 7 y 21 veces más área abierta que el ranurado horizontal y vertical respectivamente (**Figura 11**).

El tipo y disposición del ranurado en la rejilla de la tubería es determinante en el área libre disponible para el paso del flujo de agua, dichas diferencias se pueden apreciar en la **Figura 12**.

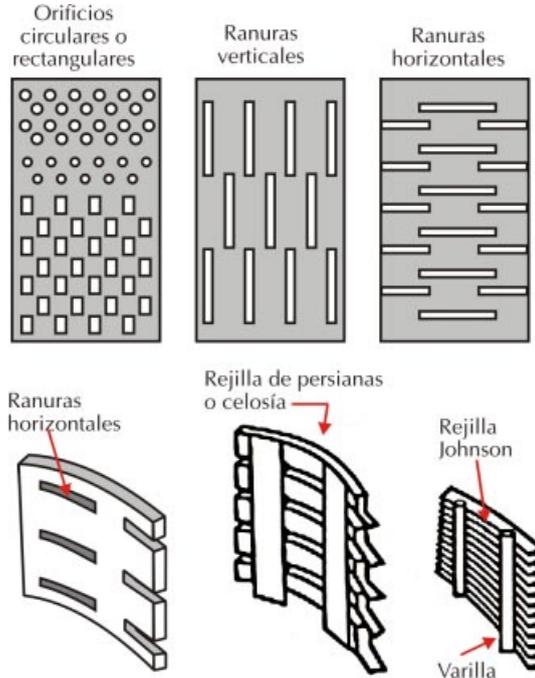


Figura 10. Tipos de ranurado en tuberías.

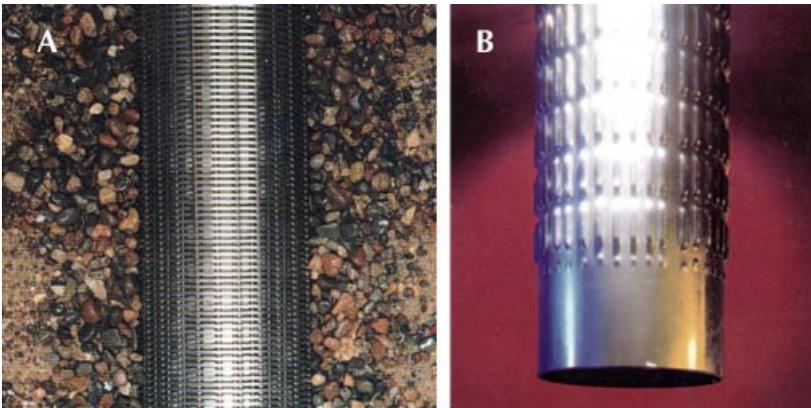


Figura 11. Ranurado en tubería del tipo horizontal (a) y vertical (b)



El tamaño de la rejilla está en función de la velocidad de entrada del flujo al interior del pozo, del espesor del acuífero, del área abierta de la rejilla y del caudal. El área abierta de la rejilla puede llegar a reducirse hasta en un 50% producto de la presencia de arenas, gravas, elementos químicos en solución y crecimientos bacteriales. La velocidad de entrada del flujo a través de la rejilla es un parámetro que se puede manejar para impedir el problema de reducción de su área. Los aumentos en velocidad y reducción de presión del agua que ingresa al pozo a través de la rejilla favorecen la formación de precipitados. Valores de velocidad de entrada del flujo recomendadas en función de la conductividad hidráulica o permeabilidad del acuífero se presentan en el **Cuadro 3**.

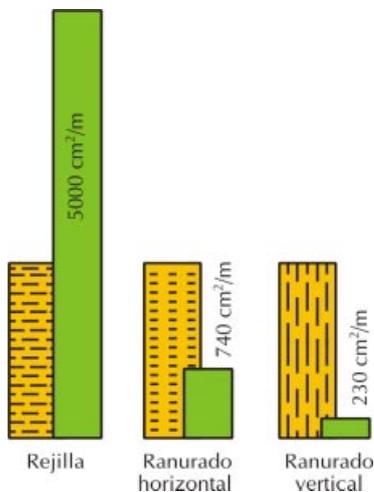


Figura 12. Diferencias de magnitud en el área abierta de tres tipos de rejilla.

Cuadro 3. Valores de velocidad de entrada recomendados en función de la conductividad hidráulica K.

K (m/día)	Velocidad de entrada (cm/s)
< 20	1,0
20	1,5
40	2,0
80	3,0
120	4,0
160	4,5
200	5,0
240	5,5
> 240	6,0



Un valor comúnmente utilizado es el recomendado por la National Water Well Association, que indica que la velocidad máxima permitida es de 3 cm/s o 0,03 m/s para valores de conductividad hidráulica iguales o mayores a 120 m/día.

El área abierta de la rejilla se calcula en función de la longitud y ancho de cada ranura y por el número de ranuras en función del diámetro de ésta. La expresión utilizada para determinar el área es la siguiente:

$$A = 2 \times D \times (n \times e \times l) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- A : área abierta total (m^2/m)
- D : diámetro de rejilla (m)
- n : número de ranuras por (m^2)
- e : ancho de la ranura (m)
- l : longitud de cada ranura (m)

Así, el área abierta efectiva (Ae) se considera igual a:

$$Ae = 0,5 \times A \quad (m^2 / m) \quad \text{Ecuación 2}$$

Esto, por que se asume que un 50% de la rejilla se tapa con materiales finos al operar el pozo. Para el cálculo de la velocidad, se divide el caudal de extracción por el área abierta de la rejilla, comprobándose que no exceda la velocidad mínima exigida.

$$V_c = \frac{Q}{L \times Ae} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- L : longitud de la rejilla (m)
- Q : caudal de extracción (m^3/s)



Si la velocidad excediera el valor 0,03 m/s, será necesario aumentar el diámetro o la longitud de la zona de captación. Para efectos del diseño, es de utilidad práctico el cuadro de valores de velocidades críticas del flujo, que se indica a continuación en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Valores de velocidad crítica del flujo según tipo de material.

Materiales del acuífero	Diámetro de los granos (mm)	Velocidad crítica (m/s)
Arenas limosas	0,01 - 0,1	0,01 - 0,02
Arenas finas	0,10 - 0,2	0,02 - 0,035
Arenas medias	0,25 - 0,50	0,04 - 0,07
Arenas gruesas	1,0 - 2,0	0,11 - 0,17
Gravas finas	2,0 - 4,0	0,18 - 0,80

Fuente: R. C. Smith. Prospección y explotación de las aguas subterráneas, citado por E. Celedón.

Por otra parte, es recomendable que el área abierta de la rejilla tenga un porcentaje mayor o igual a la porosidad de los acuíferos o a los filtros de grava o arena. Respecto al tamaño de la ranura, cuando se requiere filtro de grava se debe estimar en función del análisis granulométrico del filtro, el cual a su vez se determina en función de la granulometría de la formación donde se encuentra el acuífero. Dicho análisis se realiza mediante cribas o tamices estándar, la cantidad de material retenido por cada tamiz es expresada en peso y por ciento del total. Estos valores se grafican anotando en el eje de las ordenadas el por ciento del peso retenido acumulado, por lo que los valores de este eje van de 0 a 100. En el eje de las abscisas se grafican los valores del tamaño de los granos correspondientes, como se muestra en la **Figura 13**.

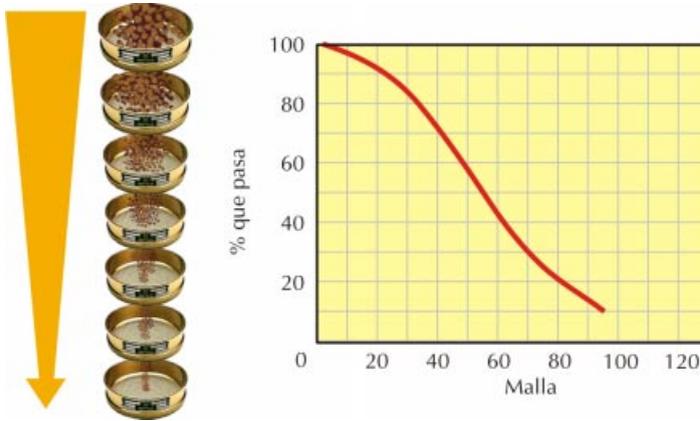


Figura 13. Tamices y curva de un análisis granulométrico.

El **diámetro efectivo** es un índice utilizado para determinar el grado de finura del material que compone al acuífero, y corresponde al tamiz equivalente de la curva granulométrica en el 90% retenido del material tamizado total acumulado. En el **Cuadro 5**, se presentan resultados de un análisis granulométrico de una muestra del material de un acuífero.

Cuadro 5. Análisis granulométrico de una muestra de material acuífero.

Abertura de tamiz (cm)	Peso acumulado (gm)	Porcentaje retenido (%)
0,165	24	6
0,117	72	18
0,084	140	35
0,058	220	55
0,041	300	75
0,030	344	86
0,020	372	93
Tamiz final	400	100



Para el caso de la muestra anterior el diámetro efectivo (90%), corresponde a una abertura de 0,020 cm.

Filtro de gravas: se le llama filtro de gravas al relleno que se coloca entre la rejilla y la pared de la perforación. Su objetivo es estabilizar la pared de la perforación evitando derrumbes; retener la mayoría de los materiales finos que contiene la formación acuífera, evitando que penetren a la cámara de bombeo; e incrementar el diámetro efectivo del pozo y asegurar una buena porosidad y conductividad hidráulica alrededor del espacio anular en el sector ranurado (**Figura 14**). En ocasiones cuando los materiales del acuífero son gruesos y uniformes no es necesario colocar un filtro de grava propiamente tal, pero sí un empaque de gravas para estabilizar las paredes de la formación acuífera y evitar derrumbes.



Figura 14. Filtro de gravas.

El material utilizado como filtro será de cantos bien redondeados, lavados y uniformes. Es fundamental una prolija selección de la grava, pues la permeabilidad del filtro debe ser mayor que la del acuífero. Se requiere de un trabajo minucioso y prudente en la colocación del filtro, procurando que no se pierda la graduación de grava elegida. El espesor del filtro de gravas deberá ser de 7 a 20 cm (3 a 8”), dependiendo este valor de la profundi-



dad del pozo y de lo regular de la construcción de la perforación; recomendándose siempre un espacio anular superior a 7 cm (3”), para evitar “punteos” del material durante su colocación. Por otro lado, valores mayores de 20 cm (8”) del espesor del filtro entorpecen las operaciones de limpieza y en ocasiones resulta casi imposible remover los residuos de lodos de perforación contenidos en los acuíferos al terminar la construcción.

En muchas ocasiones, especialmente en Chile, las características del subsuelo posibilitan la creación de la pared de grava con las propias partículas que constituyen la formación. Al respecto, el Ingeniero Mexicano Vicente Vargas (1976) sugiere la siguiente receta para el buen diseño de estos filtros: “cualquier clase de materiales, por finos que sean, se pueden controlar con un filtro constituido por grava graduada, con partículas limitadas entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro”.

Según G. Castany, citado por E. Celedón (1978), sólo procede aplicar el procedimiento de construir la pared de grava artificial cuando la granulometría del acuífero es uniforme.

13. LIMPIEZA Y DESARROLLO DEL POZO

Este proceso consiste en un conjunto de operaciones, realizadas una vez colocada la rejilla, destinadas a extraer los residuos de la perforación (lodos); a estabilizar las formaciones en torno a las rejillas, logrando un arreglo y mejoramiento en la granulometría; a aumentar la permeabilidad del acuífero al nivel que tenía previo a la perforación, y que se ve reducida por la perforación misma al compactar las paredes del pozo; a extraer la presencia de lodos que recubren las paredes de este; y finalmente, a prolongar la vida útil del pozo.



Una vez terminado el pozo deberá realizarse operaciones de limpieza que tienen como objetivo desalojar la bentonita, o en forma más general los lodos de perforación utilizados durante la construcción. Los métodos de desarrollo son básicamente vaivén y pistón, chorros de agua a altas velocidades, aire comprimido, bombes intermitentes o agitación y sobrebombeo. Es conveniente tomar en cuenta que la limpieza será más difícil conforme el acuífero sea más fino, o cuando el tiempo de construcción del pozo tenga una larga duración.

De acuerdo con lo anterior, es recomendable realizar la construcción del pozo lo más rápidamente posible, y una vez entubado y engravillado bombear y realizar las operaciones de limpieza sin pérdida de tiempo. Cuando los acuíferos son muy finos es conveniente utilizar lodos orgánicos para aprovechar su autodegradación y así, facilitar las operaciones de limpieza.

Otro factor que influye en la selección del método de limpieza del pozo, es el tipo de rejilla instalado en la zona de captación; si el área de entrada es la apropiada serán más eficientes y rápidas las operaciones de limpieza y desarrollo.

Además de los métodos mecánicos mencionados, existen aditivos químicos de agentes dispersantes que pueden acelerar el proceso de limpieza. Estos cumplen la misión de facilitar la eliminación de las arcillas presentes en el acuífero, pues las ponen en estado de suspensión, evitando su sedimentación, ya sea en el fondo del pozo o en la rejilla.



14. PRUEBAS DE BOMBEO

Las pruebas de bombeo son indispensables para conocer el comportamiento de los pozos y determinar las constantes de formación de los acuíferos (T y S). Las pruebas consisten básicamente en un control sistemático del caudal, de los niveles de agua y del tiempo transcurrido durante el bombeo del pozo. Estas pruebas son reconocidas como de caudal variable y caudal constante.

14.1. Prueba de caudal variable

La prueba de caudal variable o escalonado, consiste en bombear el pozo con diferentes caudales fijos durante períodos definidos, controlando los niveles de agua y el tiempo. Las Bases Técnicas de los Concursos a la Ley de Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje (Ley 18.450), establecen observaciones de niveles en función del tiempo conforme a la siguiente escala: 0 – 5 – 10 – 15 – 30 – 45 y 60 minutos, y después cada 30 min hasta que el nivel deprimido se estabilice, no excediendo de 12 horas por etapa.

Estas mediciones incluyen en consecuencia, el nivel estático (antes de empezar el proceso de bombeo), el caudal de agua que se extrae, simultáneamente con el nivel dinámico correspondiente, lo que se realiza con una frecuencia determinada (**ver ejemplo 1**).

Los resultados de esta prueba permiten definir la curva de “agotamiento” del pozo y con ella diseñar las condiciones de explotación de la captación, proyectando en el tiempo la tendencia de los niveles para los diversos caudales. Con ayuda de un gráfico semilogarítmico se logra tener una estimación del comportamiento del pozo a futuro.



14.2. Prueba de caudal constante

La prueba de caudal constante, similar a la anterior pero manteniendo un solo caudal durante un período definido, permite calcular la transmisibilidad del acuífero. En el caso de disponer de uno o varios pozos de observación será posible calcular el coeficiente de almacenamiento, para lo cual habrá que controlar los niveles y el tiempo en cada uno de ellos.

El tiempo de duración de las pruebas se debe condicionar a la trascendencia del proyecto y es materia de decisión del propietario de la obra. Sin embargo, lo usual es dar unas 8 a 12 horas para la prueba de caudal variable y 24 horas para la de caudal constante. La Comisión Nacional de Riego y la Dirección General de Aguas exige estos tiempos en las pruebas de bombeo, con fines de presentación de proyectos a la ley 18 450 e inscripción de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas respectivamente. Esta prueba se hará con un caudal que no supere el 90% del máximo caudal aforado en la prueba de gasto variable.

Teóricamente la variación de los niveles de agua en el pozo tiene un comportamiento de línea recta en función del logaritmo del tiempo. Por esta razón se debe medir de acuerdo con una escala de tiempos que siga aproximadamente una ley logarítmica. Una escala práctica es medir al minuto, 2, 3, 4, 5, 6; 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20; 25, 30, 35, 40; 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120; 150, 180, 210, 240..., y más minutos en la misma secuencia.



Ejemplo 1. **Registro de Prueba de bombeo**

En los **Cuadros 6** y **7**, se presenta un ejemplo de las pruebas de bombeo, tomado del documento de PRODECOP INIA-Intihuasi. El pozo que se evalúa presenta un nivel estático a los 22,69 m; efectuándose 5 pruebas a caudal variable y una prueba a caudal constante ($Q = 13 \text{ L/s}$), equivalente al 87% del caudal máximo utilizado. Es interesante destacar que la recuperación que se logra luego de la prueba a caudal variable, se efectuó en el 10% del tiempo que dura la prueba.

Cuadro 6. Prueba de bombeo a caudal variable. Datos de abatimiento y recuperación.

Nivel estático: 22,69 m
fin de recuperación: 21:14 h

Inicio de bombeo: 09:00 h
Duración de bombeo: 664 min

inicio de recuperación: 20:04 h
Tiempo de recuperación: 70 min

Fin de bombeo: 20:04 h

Etapa 1, Q = 2,1 L/s				Etapa 2, Q = 5 L/s				Etapa 3, Q = 8 L/s		
t, min	N.D., m	Abat., m	Q ^o , L/s	t, min	N.D., m	Abat., m	Q ^o , L/s	t, min	N.D., m	Abat., m
1	25,55	2,86	2,05	1	29,75	7,06		1	39,18	16,49
2	25,6	2,91		2	30,93	8,24		2	40,06	17,37
3	25,62	2,93		3	31,25	8,56		3	40,06	17,37
4	25,47	2,78		4	31,3	8,61		4	40,16	17,47
5	25,75	3,06	2,05	5	31,69	9		5	40,17	17,48
6	25,57	2,88		6	31,92	9,23		6	40,37	17,68
7	25,51	2,82	2,1	7	32,04	9,35		7	40,62	17,93
8	25,47	2,78		8	32,04	9,35		8	40,82	18,13
9	25,43	2,74		9	32,06	9,37		9	41,03	18,34
10	25,39	2,7		10	32,09	9,4		10	41,1	18,41
12	25,22	2,53		12	32,15	9,46		12	41,89	19,2
14	25,8	3,11	2,1	14	32,17	9,48		14	41,75	19,06
16	25,64	2,95		16	32,25	9,56		16	42,19	19,5
18	25,61	2,92		18	32,27	9,58		18	42,32	19,63
20	25,6	2,91	2,1	20	32,27	9,58		20	42,52	19,83
25	25,62	2,93		25	32,28	9,59		25	42,7	20,01
30	25,55	2,86		30	32,81	10,12	5	30	43,05	20,36
35	25,49	2,8	2	35	32,95	10,26		35	43,11	20,42
40	25,69	3		40	33	10,31		40	43,03	20,34
45	25,75	3,06		45	33,1	10,41	5	45	43,06	20,37
50	25,77	3,08		50	33,21	10,52		50	43,02	20,33
55	25,84	3,15		55	33,35	10,66		55	43,06	20,37
60	25,88	3,19		60	33,43	10,74	5	60	43,05	20,36
70	25,81	3,12	2,1	70	33,62	10,93		70	43,32	20,63
80	25,81	3,12	2,1	80	33,69	11		80	43,3	20,61
90	25,75	3,06	2,1	90	33,77	11,08		90	43,31	20,62
100	25,75	3,06		100	33,92	11,23		100	43,37	20,68
110	25,75	3,06		110	33,89	11,2		110	43,39	20,7
120	25,75	3,06		120	33,91	11,22		120	43,39	20,7

Q^o: ajuste de caudal





Cuadro 6. Continuación.

Etapa 4, Q = 13,5 L/s				Etapa 5, Q =15 L/s				Recuperación		
t, min	N.D.,m	Abat.,m	Q°, L/s	t, min	N.D.,m	Abat.,m	Q°, L/s	t, min	N.D.,m	N.Res.,m
1	49	26,31		1	71,2	48,51		665	38,5	15,81
2	52,06	29,37		2	72,14	49,45		666	32,53	9,84
3	53,06	30,37		3	73,21	50,52		667	30,17	7,48
4	54,34	31,65		4	74,09	51,4		668	29,03	6,34
5	55,64	32,95						669	28,26	5,57
6	55,86	33,17	13,5					670	27,67	4,98
7	56,04	33,35						671	27,33	4,64
8	56,54	33,85						672	27,03	4,34
9	57	34,31						673	26,7	4,01
10	57,53	34,84						674	26,4	3,71
12	57,21	34,52	13,5					676	26,02	3,33
14	57	34,31						678	25,7	3,01
16	57,77	35,08						680	25,4	2,71
18	57,94	35,25						682	25	2,31
20	58,4	35,71						684	24,66	1,97
25	58,63	35,94						689	24,36	1,67
30	59,42	36,73						694	24,1	1,41
35	59,66	36,97						699	24,01	1,32
40	59,49	36,8						704	23,88	1,19
45	59,41	36,72						709	23,7	1,01
50	59,43	36,74						714	23,6	0,91
55	59,29	36,6	13,5					719	23,54	0,85
60	64,74	42,05						724	23,47	0,78
70	65,77	43,08						734	23,15	0,46
80	66,4	43,71								
90	64,94	44,25	13,5							
100	68,19	45,5								
110	69,2	46,51								
120	69,12	46,43								
130	69,07	46,38								
140	69,1	46,41								
150	69,92	47,23								
160	69,37	46,68								
170	68,59	45,9								
180	68,58	45,89								
190	68,61	45,92								
200	69,06	46,37								
210	69,18	46,49								
220	68,93	46,24								
230	68,97	46,28								
240	69,07	46,38								
250	69,05	46,36								
260	69,09	46,4								
270	68,96	46,27								
280	68,98	46,29								
290	69,05	46,36								
300	69,07	46,38								

A los 4 min se alcanza el nivel de agotamiento, se detiene la bomba y se toma la recuperación.



**Cuadro 7. Prueba de bombeo a caudal constante.
Datos de abatimiento y recuperación.**

Inicio de bombeo: 19/04/97; 21:14
Fin de bombeo: 20/04/97; 21:14 h
Duración de bombeo: 1440 min

Inicio de recuperación: 20/04/97; 21:14 h
Fin de recuperación: 21/04/97; 08:00 h
Tiempo de recuperación: 646 min

Bombeo a Q Cte., 13 L/s				Bombeo a Q Cte., 13 L/s				Recuperación		
t, min	N.D.,m	Abat.,m	Q ⁰ , L/s	t, min	N.D.,m	Abat.,m	Q ⁰ , L/s	t, min	N.D., m	Abat.,m
1	39,68	16,99		210	62,8	40,11		1441	38,96	16,27
2	46,72	24,03		240	63	40,31		1442	31,56	8,87
3	48,02	25,33		270	63,18	40,49		1443	29,39	6,7
4	50,95	28,26		300	63,36	40,67		1444	28,55	5,86
5	51,94	29,25		330	64	41,31		1445	28	5,31
6	52,51	29,82		360	64,31	41,62	12,5	1446	27,42	4,73
7	53,55	30,86		390	65,2	42,51		1447	26,89	4,2
8	54,77	32,08		420	68,17	45,48		1448	26,67	3,98
9	55,36	32,67		450	70,59	47,9		1449	26,48	3,79
10	55,76	33,07		480	72,14	49,45		1450	26,23	3,54
12	56,79	34,1		510	74,28	51,59	12.0*	1452	25,8	3,11
14	56,81	34,12		540	70,1	47,41		1454	25,54	2,85
16	57,18	34,49		570	70,34	47,65		1456	25,31	2,62
18	57,23	34,54		600	70,59	47,9		1458	25,1	2,41
20	57,65	34,96		630	70,08	47,39		1460	24,94	2,25
25	58,25	35,56		660	70,61	47,92		1465	24,6	1,91
30	58,55	35,86		690	70,78	48,09		1470	24,36	1,67
35	58,91	36,22		720	70,62	47,93		1475	24,2	1,51
40	59,51	36,82		750	70,54	47,85		1480	24,05	1,36
45	60	37,31		780	70,49	47,8		1485	23,94	1,25
50	60,41	37,72		810	70,88	48,19		1490	23,81	1,12
55	60,73	38,04		870	67,65	44,96	11.5*	1495	23,7	1,01
60	60,51	37,82		930	67,35	44,66		1500	23,61	0,92
70	60,24	37,55		990	67,25	44,56		1510	23,52	0,83
80	60,3	37,61		1050	66,67	43,98		1520	23,45	0,76
90	60,71	38,02		1110	67,68	44,99		1530	23,38	0,69
100	61,15	38,46		1170	68,67	45,98		1620	22,98	0,29
110	61,24	38,55		1230	69,34	46,65		2086	22,84	0,15
120	62,06	39,37		1290	69,49	46,8				
130	62,52	39,83		1350	69,35	46,66				
140	62,85	40,16		1410	69,39	46,7				
150	62,62	39,93		1440	69,37	46,66				
160	62,08	39,39								
170	62,83	40,14								
180	62,74	40,05								

Q⁰: se comprueba caudal

* nivel de agotamiento



DEMANDA DE AGUA POR PARTE DE LOS CULTIVOS

Oscar Reckmann A.

Ingeniero Agrónomo, M. Sc.

INIA La Platina.

1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación (E) es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Incluye tanto la evaporación de agua líquida o sólida directamente desde el suelo o desde las superficies vegetales vivas o muertas (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), como las pérdidas de agua a través de las superficies vegetales, particularmente las hojas. En este último proceso, denominado transpiración (T), el agua absorbida por medio de las raíces, se transfiere a la atmósfera fundamentalmente a través de los estomas situados en las hojas. Fue la dificultad de discriminar E y T en condiciones naturales, lo que obligó a introducir el concepto de evapotranspiración (ET). Por lo tanto, la evapotranspiración constituye la transferencia total de agua desde una superficie con cubierta vegetal a la atmósfera (**Figura 15**).

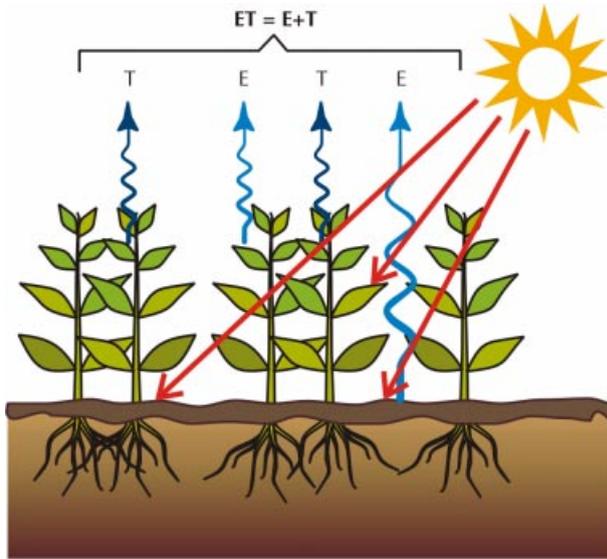


Figura 15. Evapotranspiración de cultivo.

La importancia cuantitativa de este proceso es tal que, como promedio global, el 57% de la precipitación anual es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración, alcanzando valores del 90 y 100% en zonas áridas y desérticas. Las cantidades de agua que por este concepto vuelven a la atmósfera y la energía necesaria para ello, alcanzan cifras también realmente notables. En un día cálido, es frecuente en muchas zonas una ET de 3 - 4 mm día⁻¹, lo que equivale a 30 - 40 m³ ha⁻¹ día⁻¹.

Por tanto, la ET es un componente fundamental del balance del agua y un factor clave en la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera. Su cuantificación se hace precisa en contextos diferentes tales como la producción vegetal, la planificación y gestión de recursos hídricos o estudios ambientales y ecológicos, y afecta por tanto a una gran variedad de especialidades científicas como climatólogos, ecólogos vegetales y fisiólogos y especialistas en hidrología.

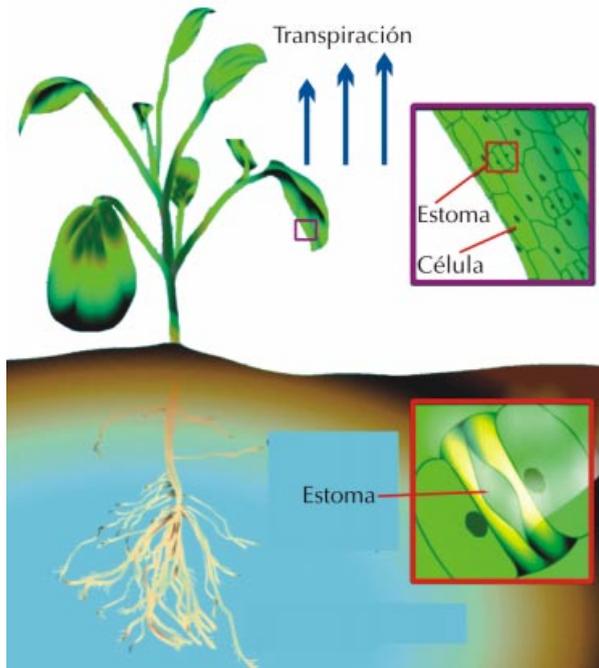


Figura 16. Transpiración de cultivo.

2. BALANCE HÍDRICO DE UN SUELO REGADO

El propósito de aplicar agua de riego a los cultivos es de abastecer al vegetal con el agua necesaria con el fin de optimizar la relación “agua de riego/producción”. El contenido de agua en el suelo luego de ser aplicada con el riego sufre una serie de transformaciones y transferencias. Existe absorción por parte de las raíces, translocación y transpiración en las plantas, evaporación directa desde el suelo, percolación profunda y escurrimiento superficial. En la **Figura 17**, se ilustra el balance de agua y sus interacciones en el sistema suelo-planta-atmósfera.

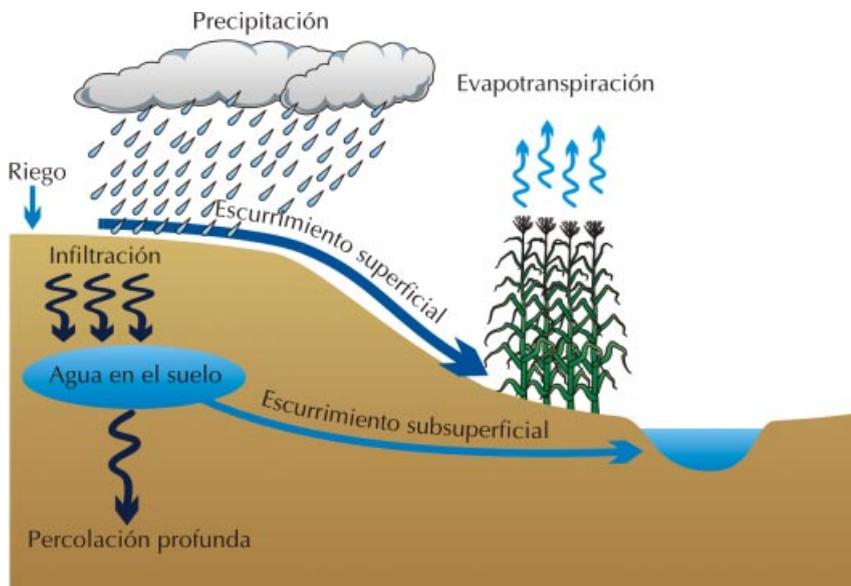


Figura 17. Balance de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera.

Una descripción breve pero integradora del sistema suelo-planta-atmósfera puede iniciarse desde el suelo. La planta absorbe agua del suelo y la emite en forma de vapor a la atmósfera en el proceso denominado transpiración (T), a su vez el suelo emite vapor a la atmósfera en el proceso de evaporación (E). La pérdida total de agua del conjunto suelo-planta en forma de vapor en los procesos de evaporación y transpiración se denomina evapotranspiración (ET).

Estas pérdidas de vapor son mayores, cuanto mayor es la temperatura, más fuerte es el viento y más seco es el aire. Ambos procesos, evaporación y transpiración, se ven afectados por la demanda evaporativa de la atmósfera, por la cantidad de agua disponible en el suelo, naturaleza del suelo y las características de la cubierta vegetal.



En nuestro país existen importantes áreas agroecológicas que se ubican en zonas con climas áridos y semiáridos con períodos secos entre 6 y 8 meses, generando una alta dependencia de agua de riego para los cultivos. Si el método de riego utilizado es correctamente seleccionado y bien operado, las pérdidas de agua llegan a disminuir en forma importante y por lo tanto el requerimiento de riego pasa a ser altamente dependiente de la evapotranspiración.

Por otra parte, en las áreas de riego con climas subhúmedos y húmedos el requerimiento de riego puede disminuirse en función de las precipitaciones que caen en épocas del año que coinciden con el período de crecimiento de los cultivos, además del aporte por capilaridad cuando hay presencia de napas freáticas superficiales. Es así, como la ET varía con la estación del año y la suma de esta durante los correspondientes períodos de crecimiento de cada cultivo determina el volumen de agua requerido. Bajo estas circunstancias es posible realizar el riego con sistemas de riego gravitacional (surco) y goteo, incluso es posible realizar riego a partir de napas subsuperficiales aprovechando los fenómenos de capilaridad.

Cuando el cultivo está estableciéndose en terreno la componente dominante de la ET es la evaporación (E). A medida que el cultivo crece, desarrolla superficie foliar y cubre más terreno, aumenta la componente transpiración (T) y a su vez disminuye la evaporación por sombreado de suelo. Llegando la T a alcanzar valores de 90 a 95% de la ET. Es evidente que este concepto es la componente básica del requerimiento de riego de parte de los cultivos por lo que su medición o estimación llega a ser de fundamental importancia con fines de planificación.

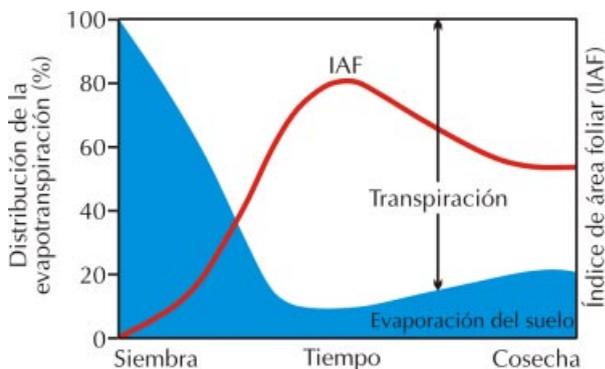


Figura 18. Distribución de la evapotranspiración, en transpiración y evaporación durante el período de crecimiento de un cultivo anual.

3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET_0)

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la “Evapotranspiración”, corresponde a la cantidad de agua usada por la planta, durante todo el período de desarrollo en los procesos de transpiración y formación de tejidos, más el agua perdida a través de la evaporación directa desde el suelo.

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), representa una tasa de evapotranspiración que ocurre desde una superficie de referencia cubierta de pasto con características definidas, en condiciones de abastecimiento hídrico adecuado. Este concepto se utiliza para determinar la demanda evapotranspirativa de la atmósfera independiente del tipo de cultivo, su desarrollo y prácticas de manejo normalmente utilizadas. Como es una cubierta vegetal que no se encuentra bajo restricción hídrica los factores de suelo no afectan la evapotranspiración, sino los componentes



climáticos mayormente (temperatura, viento, radiación solar, período luminoso del día, humedad ambiente y precipitación). La ET_0 por lo tanto permite comparar la evapotranspiración producida en el cultivo estándar (pasto) con la evapotranspiración ocurrida en otras especies vegetales. Obviamente es necesario además de establecer el cultivo bajo análisis, el determinar su estado de crecimiento al momento de realizar la comparación.

El único método aceptado para la obtención de la ET_0 es el recomendado por la FAO y que utiliza la ecuación de Penman-Monteith. Este método corresponde a una ecuación que describe la evapotranspiración desde una superficie vegetal uniforme, que incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos ajustándose muy bien a los valores reales en pruebas con lisímetros bajo distintas condiciones climáticas (**Figura 19**).

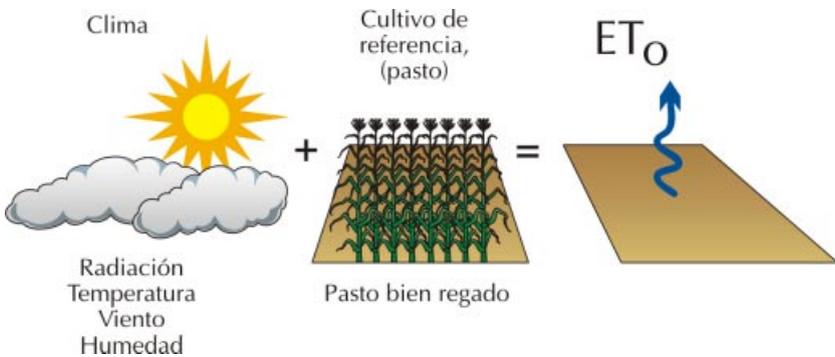


Figura 19. Evapotranspiración del cultivo de referencia.

Valores típicos de ET_0 para condiciones climáticas distintas se presentan en el **Cuadro 8**. Esta información se entrega solo con fines referenciales y en ningún caso se pueden utilizar para realizar estimaciones de la misma.



Cuadro 8. Evapotranspiración potencial (ET_0) promedio según climas en mm/día.

Clima (Región templada)	Temperatura media diaria (°C)		
	Fría 10°C	Moderada 20°C	Cálida > 30°C
Húmedo y subhúmedo	1-2	2-4	4-7
Arido y semiárido	1-3	4-7	6-9

Fuente: FAO, 1998

En el **Cuadro 9** y a modo de ejemplo, se presentan valores de Evapotranspiración del cultivo de referencia para dos zonas características de cultivo de frutilla en Chile.

Cuadro 9. Evapotranspiración potencial (ET_0) para dos zonas características de cultivo de frutilla en Chile.

Región	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
VI costa	2,32	3,23	3,92	4,91	5,12	4,15	3,45
VII interior	2,12	3,22	4,22	5,40	5,74	4,50	3,49

(Fuente: Cartografía de la Evapotranspiración Potencial de Chile, CNR-CIREN).

A partir desde este punto, se utilizara el cultivo de frutilla a modo de ir ejemplificando los contenidos expuestos.

4. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO (ET_c)

La evapotranspiración de cultivo (ET_c) se define como el agua evapotranspirada por un cultivo creciendo en una superficie, bien fertilizado, bajo condiciones óptimas de suelo y agua, libre de enfermedades y que alcanza su producción potencial en un medio ambiente dado.



La cantidad de agua requerida para compensar las pérdidas provocadas por la ET_c se conocen como los requerimientos de agua de riego del cultivo, los que básicamente representan la diferencia entre el requerimiento de agua de los cultivos y la precipitación efectiva, a veces también considera el agua necesaria para el lavado de sales y para la compensación de la desuniformidad en la aplicación.

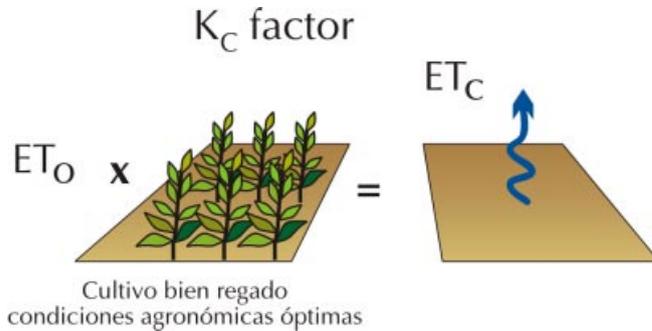


Figura 20. Evapotranspiración real o del cultivo.

La ET_c al igual que la ET_0 puede ser calculada a partir de parámetros climáticos a través de diferentes métodos. Sin embargo, como aún no se cuenta con información suficiente para diferentes cultivos, el método de Penmann-Monteith se utiliza para la obtención del estándar de referencia ET_0 . Así experimentalmente se obtiene la relación ET_c / ET_0 denominado Coeficiente de Cultivo o K_c . Finalmente estos valores son utilizados para obtener la relación:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- ET_c : Evapotranspiración del cultivo (mm/día)
- K_c : Coeficiente de cultivo (adimensional)
- ET_0 : Evapotranspiración potencial o de referencia (mm/día)



El coeficiente de cultivo varía entre especies y durante el crecimiento de una especie, en función de este último concepto es que se han definido estados de crecimiento estándar.

5. ESTADOS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO

El crecimiento del cultivo durante su ciclo de desarrollo se traduce en una variación en la altura de este, grado de cobertura del suelo por la superficie vegetal, entre otros; generando distintos valores de K_c durante este período. Se ha establecido (FAO, 1977 y 1998) como normativa dividir el ciclo de desarrollo del cultivo en 4 fases de crecimiento: Inicial, desarrollo, media estación y madurez (**Figura 21**).

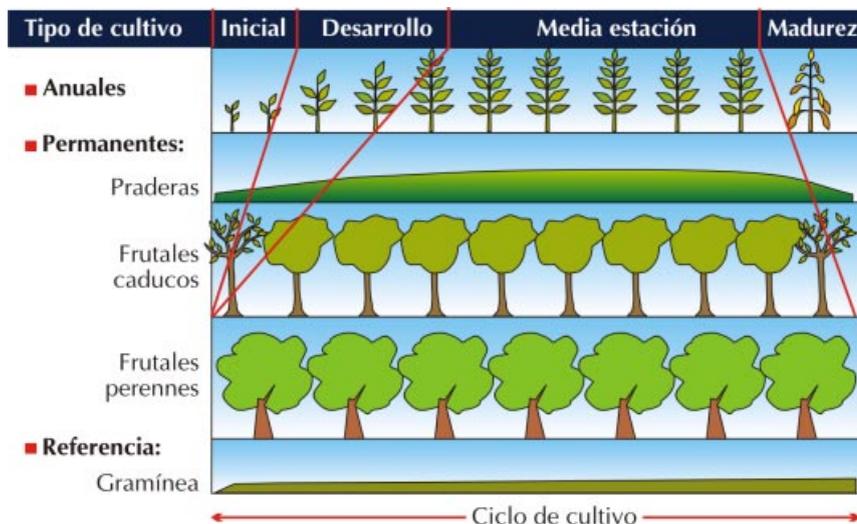


Figura 21. Fases de cultivo según tipo de especies vegetales.

En las **Fotos 1, 2, 3 y 4**, se presentan las fases del cultivo de frutilla asociadas a fases.



Foto 1.
Fase 1 inicial en cultivo de frutilla.



Foto 2.
Fase 2 de desarrollo en cultivo de frutilla.



Foto 3.
Fase 3 de media estación en cultivo de frutilla.



Foto 4.
Fase 4 de madurez en cultivo de frutilla.

Fase 1 inicial: Esta fase corresponde al período de plantación o siembra hasta cuando el cultivo alcanza alrededor de un 10% de cobertura vegetal. La duración de este período depende del cultivo, la variedad, fecha de plantación y el clima.



Fase 2 de desarrollo: Comienza cuando el cultivo ha alcanzado un 10% de cobertura hasta cubrir totalmente la superficie. En la mayoría de las especies la cobertura de un 100% se alcanza con inicios de floración. En el caso de cultivos hilerados como la frutilla esto ocurre cuando las hojas entre las hileras se tocan.

Fase 3 de media estación: Esta fase se inicia con cobertura vegetal de un 100% hasta inicio de madurez del cultivo. El inicio de madurez se refleja en la mayoría de las especies a través del amarillamiento y senescencia y caída de las hojas o el cambio de color en el fruto. Esta fase es la de mayor duración tanto para especies anuales como perennes, pero puede llegar a ser muy corta para hortalizas de consumo fresco.

Fase 4 de madurez: Comienza con inicios de madurez y finaliza con la cosecha o senescencia total del cultivo.

6. OBTENCIÓN DE LA CURVA DE K_c

Para obtener los valores de K_c para las diferentes fases del cultivo se deben consultar las tablas existentes en bibliografía donde se entregan distintos valores según especies y climas, en Anexo 1 se muestran los valores de K_c aceptados por la Comisión Nacional de Riego (CNR). Sin embargo, se recomienda obtener información respecto a la estación de crecimiento y tasa de crecimiento de los cultivos bajo riego de la zona en estudio.

En el **Cuadro 10**, se presentan valores de K_c obtenidos para cultivo de frutilla bajo plástico en clima semiárido, (FAO, 1998, Simone *et al* 1995, Martínez, 1995).



Cuadro 10. Valores de K_c para frutilla bajo mulch en clima semiárido, según fases del cultivo.

Fases	1	2	3	4
K_c	0,4	0,5	0,7	0,6

7. UNIDADES

La evapotranspiración normalmente es expresada en milímetros (mm) por unidad de tiempo (día, mes, año) y representa la cantidad en altura de agua evapotranspirada desde una superficie cultivada.

Como una hectárea corresponde a una superficie de 10000 m² y 1 mm es igual a 0.001 m, es equivalente a 10 m³ por hectárea. En otras palabras 1mm de agua evapotranspirada al día corresponde a 10 m³ ha⁻¹ día⁻¹.

8. EVAPORACIÓN DE BANDEJA

Otra forma de obtener la ET_o , es a partir de la evaporación de bandeja tipo A, la cual provee de una medida del efecto integrado de radiación, viento, temperatura y humedad sobre la evaporación de una superficie libre de agua específica. En forma similar las plantas responden del mismo modo a las variables climáticas, pero un mayor número de factores pueden producir diferencias significativas en la pérdida de agua.

Por ejemplo, el reflejo o albedo de la radiación solar de una superficie de agua es solo de 5 a 8% mientras que en las superficies vegetales es del 20 al 25%. El almacenamiento de calor dentro



Foto 5. Bandeja de evaporación.

de la bandeja puede ser apreciable y puede tener igual evaporación tanto en el día como en la noche; los cultivos por su parte transpiran principalmente durante el día. Por otro lado, las pérdidas de agua en la bandeja y de los cultivos pueden ser causadas por diferencias en turbulencias, temperatura y humedad del aire inmediatamente por encima de la superficie.

No obstante estas diferencias, con una localización apropiada la evapotranspiración de referencia para períodos de 10 días o mayores puede obtenerse con bastante precisión a través de la bandeja de evaporación. Para relacionar la evaporación de bandeja con la evaporación de referencia, empíricamente se ha derivado un coeficiente de bandeja o K_b , el cual depende de variables climáticas y de la localización de la bandeja.



El tanque o bandeja de evaporación ha sido estandarizado en cuanto a sus medidas (**Figura 22**), se construye de hierro galvanizado de 8 mm de espesor. La bandeja se debe instalar sobre una estructura de madera la cual se encuentra ubicada a 15 cm. sobre la superficie del suelo. La bandeja debe quedar nivelada. El agua se renueva al menos una vez a la semana para eliminar la turbidez. El hierro galvanizado se debe pintar al menos una vez al año con pintura de aluminio. Se recomienda ubicar la bandeja sobre un sitio abierto de 20 por 20 metros, cubierto de césped, permitiendo la libre circulación del aire. Se recomienda instalar la bandeja a sotavento o al centro de superficies importantes de cultivo.

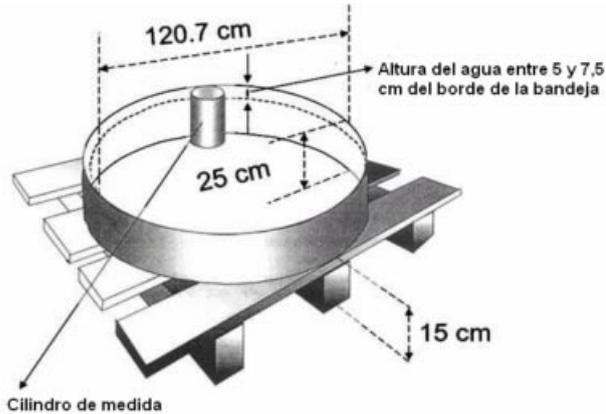


Figura 22. Bandeja de evaporación tipo A.

Las lecturas del agua evaporada deben realizarse diariamente como también del agua caída por precipitación. El control se realiza en un cilindro de alrededor de 10 cm. de diámetro y 20 cm. de altura situado cerca del borde de la bandeja. Este tiene un nivel que es una aguja metálica en posición vertical perpendicular a la base y ubicada en el centro del cilindro, que facilita la lectura de la bandeja cuando el agua enrasa en la punta de la



aguja. Además, el cilindro tiene un pequeño orificio en su base para mantener un equilibrio de niveles de agua.

La relación existente entre la evaporación de bandeja y la evapotranspiración de referencia es la siguiente:

$$ET_o = K_b \times EB \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración potencial o de referencia (mm/día).

EB : Evapotranspiración de bandeja (mm/día).

K_b : Coeficiente de bandeja (adimensional).

Los valores de K_b se presentan en el **Cuadro 11**, para diferentes condiciones de humedad relativa, velocidad del viento y ubicación de la bandeja.

Al seleccionar el valor apropiado de K_b para la bandeja de evaporación es necesario considerar la cobertura del terreno donde esta localizado la bandeja, la cobertura vegetal de los alrededores y las condiciones generales del viento y la humedad.

Cuando la bandeja se localiza en áreas pequeñas pero rodeadas de especies de mayor altura, maíz o frutales (2,5 o más metros) los coeficiente de bandeja deben incrementarse en un 30% para climas secos y ventosos, mientras que solo de un 5 a un 10% de incremento se requiere en áreas bajo condiciones de leve viento y humedad alta.



Cuadro 11. Coeficiente de bandeja tipo A, según localización y condiciones ambientales: humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s).

Velocidad del viento (m/s)	Bandeja ubicada sobre césped				Bandeja ubicada sobre suelo desnudo			
	Distancia respecto a un cultivo (m)	Humedad relativa (%)			Distancia respecto a suelo seco (m)	Humedad relativa (%)		
		Baja < 40	Media 40-70	Alta >70		Baja < 40	Media 40-70	Alta >70
Leve	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
Moderada	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
Fuerte	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,40	0,45	0,50	1000	0,40	0,45	0,55
Muy fuerte	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

Fuente: FAO. Riego y drenaje. Boletín N° 24.

9. DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA DE LOS CULTIVOS

Como ya lo hemos mencionado las necesidades de riego de los cultivos dependen fundamentalmente del clima, de las características del propio cultivo, del tipo de suelo y de la eficiencia del sistema de riego utilizado. La Organización de las Naciones Uni-



das para la Agricultura y la Alimentación (FAO) a partir de la década de los setenta desarrolló una metodología para la determinación de las necesidades hídricas y de riego de los cultivos que ha sido utilizada ampliamente en todo el mundo por especialistas de riego (Doorenbos y Pruitt, 1977, Allen *et al*, 1998). Según esta metodología, el cálculo de las necesidades de agua de riego de los cultivos se realiza en tres etapas principales:

9.1. Evapotranspiración de los cultivos (ET_c)

Los valores de ET_c constituyen las necesidades hídricas brutas de los cultivos para su desarrollo óptimo y representan la cantidad de agua que debe existir en la zona radical de un cultivo para satisfacer su demanda evaporativa. La ET_c de un cultivo se determina en función del clima, cuyo efecto se engloba en el concepto de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), y las características propias del cultivo, efecto que se engloba en el concepto de coeficiente de cultivo (K_c).

9.2. Demanda de agua neta de los cultivos (D_n)

Estas necesidades constituyen la cantidad de agua que se ha de suministrar a la zona radical del cultivo mediante el riego. Para calcular las D_n , se descuenta de la ET_c la cantidad de agua aportada por la precipitación efectiva (PE), que representa la fracción de la precipitación que contribuye a satisfacer la ET_c de un cultivo ($D_n = ET_c - PE$). Cuando se determina ET_c para un periodo sin precipitaciones entonces la D_n es igual a la ET_c .

9.3. Demanda de agua bruta de los cultivos (D_b)

Estas necesidades representan la cantidad de agua que el sistema de riego ha de proporcionar a nivel predial para que, tras des-



contarse las pérdidas de agua debido a la ineficiencia del sistema de riego (ningún sistema tiene una eficiencia del 100 %) la cantidad de agua que realmente se almacene en dicha zona radical sea igual a las D_b del cultivo. Finalmente la Demanda de agua bruta (D_b) se obtienen a partir de la siguiente relación:

$$D_b = \frac{D_n}{E_{fr}} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

D_b : Demanda de agua bruta (mm/día)

D_n : Demanda de agua neta (mm/día)

E_{fr} : Eficiencia de riego (%)

Ejemplo 2: Requerimiento hídrico del cultivo de frutilla

A continuación, se desarrolla un ejemplo utilizando la metodología antes descrita:

Se desea obtener la demanda de agua, expresada en litros por día, para cada metro de hilera plantada en el mes de enero, de una plantación de frutillas regada con cinta de riego. La plantación esta en camellones de 0,8 m de ancho con dos hileras de plantas por camellón distanciados a 1,2 m. Las hileras en el camellón están distanciadas a 30 cm. y las plantas a 20 cm. una de la otra. La plantación se encuentra ubicada en la comuna de Marchigüe, zona de secano en la VI región.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) para el mes de enero en la costa de la VI región es de 5,12 mm/día. La frutilla en enero en dicha zona se encuentra en la fase 3 del cultivo, es decir le



corresponde un Coeficiente de Cultivo (K_c) de 0,7 (Cuadro 10). Con ambos datos obtenemos la Evapotranspiración del cultivo (ET_c), a partir de la ecuación 4, presentada en el punto 4, **Evapotranspiración de cultivo**, del presente capítulo:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

$$Et_c = 0,7 \times 5,12 = 3,6 \text{ mm / día}_o$$

Luego la demanda de agua neta (D_n) son equivalentes a la ET_o producto de que la precipitación efectiva (PE) según la zona y el mes es despreciable o cero.

Se asume una eficiencia de riego de 90% para cinta de riego, entonces:

$$Db = \frac{3,6}{90} \times 100 = 4,0 \text{ mm/día}$$

4 mm/día equivalen a 4 L/m²/día, asumiendo que en las dos hileras de frutillas en el camellón se tiene en un metro lineal un ancho ocupado por el cultivo de 60 cm (30 cm. entre hilera más 15 cm. en cada borde), por lo tanto la superficie utilizada en un metro lineal del cultivo es de 0,6 m² (0,6 m x 1 m).

Por lo tanto, el requerimiento diario de agua para dicha superficie durante el mes de enero es de:

$$4,0 \text{ litros/m}^2/\text{día} \times 0,6 \text{ m}^2 = 2,4 \text{ litros/día, en } 0,6 \text{ m}^2 \text{ de cultivo}$$

En 100 m lineales tenemos un requerimiento de 240 L. Como en una hectárea hay 83 camellones (100 m / 1,2 m entre camellones) la demanda del cultivo en una hectárea es de 19.920 litros/día.



Estas necesidades se calcularon a partir de datos meteorológicos e información de cultivos que representan a un año promedio. En consecuencia, las necesidades hídricas y de riego aquí calculadas representan así mismo las necesidades para un año promedio. En condiciones reales, por ejemplo en años particularmente secos y calurosos, estas necesidades deberían ajustarse de acuerdo con las características climáticas de dichos años.

La información presentada se debe considerar con precaución ya que la identificación de las distintas fases de desarrollo de los cultivos es muy subjetiva. Básicamente porque, existe una variabilidad amplia de las fechas de plantación y de madurez/cosecha para un mismo cultivo ya que dependen de la variedad del cultivo, de las prácticas de manejo realizadas por cada agricultor y de las condiciones climáticas de cada año. Asimismo, la variabilidad climática interanual puede conducir a una variación importante de la duración de las distintas fases del cultivo. En definitiva, los valores en las tablas recogen solo valores medios representativos de las prácticas culturales generales promedio de la región.





EFICIENCIA DE RIEGO EN SISTEMAS LOCALIZADOS

Alejandro Antunez B.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
INIA La Platina

Sofía Felmer E.
Ingeniero Agrónomo
INIA Rayentué

David Mora L.
Ingeniero Agrónomo
INIA Rayentué

1. INTRODUCCIÓN

En zonas en que la restricción de recursos hídricos es relevante, como es el caso del secano de la zona central de Chile, es importante conocer los parámetros físico-hídricos de los suelos, con el fin de evaluar tecnologías y el manejo del los sistemas, detectando causas de posibles deficiencias en la utilización del agua de riego.

La caracterización hídrica de los suelos consiste en la determinación y análisis de los parámetros físicos del sustrato, que tienen relación con la retención, infiltración y disponibilidad de agua para las plantas. Una vez analizados estos parámetros, es posible determinar frecuencias y tiempos de riego, advirtiendo incluso problemas de diseño de los sistemas de riego utilizados, que pueden afectar directamente la eficiencia de aplicación del agua.

En general, la eficiencia con que los agricultores aplican el agua de riego depende de dos factores: el manejo del agua durante el riego, y las características hídricas del suelo que se está regando.



Las pérdidas o ineficiencias del sistema de riego se relacionan con el manejo del agua y con las características físico-hídricas del suelo a regar. Entre los factores de manejo que influyen en la eficiencia de riego se encuentran el diseño del sistema, los caudales de riego utilizados, la frecuencia y el tiempo de riego empleado. Por otra parte, entre los factores del suelo destacan la velocidad de infiltración del agua, la capacidad de retención de agua, la densidad aparente y la profundidad del suelo y sus condiciones de estratificación (Gurovich, 1997).

Esta interacción entre el manejo del agua de riego y las características hídricas del suelo, determina la eficiencia de utilización del agua de riego. Por lo anterior, es importante definir eficiencia de riego y sus componentes.

2. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA DE RIEGO

La eficiencia en el uso del agua de riego a nivel intrapredial, se integra a partir de la determinación de tres subcomponentes, que incluye las pérdidas de éste recurso desde su aplicación, uniformidad y almacenamiento en el suelo. Para maximizar la eficiencia en el uso del recurso, es importante definir estos componentes, incluyendo técnicas y recomendaciones para optimizar el uso del agua a nivel intrapredial.

La eficiencia de aplicación de agua determina directamente la superficie factible de regar sin causar déficit hídrico al cultivo. De esta forma, en términos generales, dado cierto caudal disponible, la superficie máxima a regar a partir de esta fuente puede



Llegar a duplicarse al cambiar de riego por surcos a riego por goteo, por ejemplo. Esta condición es determinante en la inclinación de los productores de áreas con severas restricciones de recursos hídricos, a invertir en sistemas de riego presurizados del tipo goteo o microaspersión. Aún cuando los sistemas de riego por goteo alcanzan eficiencias teóricas del orden del 90% al 95%, en la práctica un mal manejo del riego puede ocasionar una merma relevante en el desempeño del sistema, con pérdidas de agua de diversa naturaleza.

Ejemplo 3. **Cálculo de la máxima superficie posible de regar**

Para la zona de Litueche, la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) para el mes de diciembre es de 180 mm (Santibáñez y Uribe, 1993), equivalente a una demanda diaria de 5,8 mm/día. Para el cultivo de frutillas, con un K_c para el mismo mes equivalente a 0,85, representa una evapotranspiración del cultivo (ET_c) o lámina neta de 4,93 mm/día.

La lámina neta equivale a la altura de agua que debe ser repuesta en el suelo, para satisfacer los requerimientos de evapotranspiración del cultivo de frutillas. Para regar adecuadamente, esta altura de agua debe compensarse por la eficiencia del sistema de riego. Si en teoría, un sistema de riego por goteo alcanza un 90% de eficiencia, la lámina bruta a aplicar en el cultivo de frutillas será equivalente a 5,48 mm/día. Esta demanda bruta equivale a un caudal continuo de 0,634 L/s/ha (5,48 mm/día x 0,115741). De esta forma, es posible determinar la superficie máxima a regar, dado un cierto cultivo, localidad y caudal disponible (**Cuadro 12**).



Cuadro 12. Máxima superficie regable de frutillas por goteo con 90% de eficiencia a partir de cierto caudal disponible, en la localidad de Litueche, Región de O'Higgins.

Q disp. (L/s)	Sup. Regable (ha)
0,5	0,9
1,0	1,8
1,5	2,6
2,0	3,5
2,5	4,4
3,0	5,3
5,0	8,8
10,0	17,6

De acuerdo al Cuadro 12 y considerando un caudal 0,634 L/s/ha, del ejemplo planteado, entonces la máxima superficie posible de regar será de 1,14 ha ($0,634 \times 0,9 / 0,5$).

Este sencillo cálculo, cobra gran relevancia en la toma de decisiones de los productores en zonas de secano, limitando la superficie a plantar sin causar déficit hídrico en el cultivo. Cabe destacar, que si la eficiencia cae por debajo del 90% estimado para el riego por goteo, la superficie regable a partir del caudal disponible puede llegar a ser considerablemente menor, con importantes pérdidas de rendimiento y calidad en el cultivo, comprometiendo incluso la viabilidad del cultivo en secano.

Es importante destacar que la mayor parte de los sistemas de riego, no funcionan con la eficiencia óptima de cada método. Por ejemplo, estudios intraprediales en Estados Unidos han demostrado que, en promedio, cerca del 25% de la energía eléctrica empleada en sistemas de riego está siendo mal aprovechada, debido a bajas eficiencias de bombeo o del motor de la bomba.



El riego excesivo también representa una pérdida de energía y dinero y, frecuentemente, los problemas del equipo tienden a estar acompañados de problemas de manejo. Un equipo mal diseñado, ineficiente o con problemas de mantención disminuye el control que ejerce el regador sobre la forma de aplicación del agua. Problemas como calidad del agua o falta de presión en los laterales hacen imposible reponer adecuadamente el agua en el suelo, conduciendo a estrés hídrico en los cultivos, disminución de rendimientos, pérdidas de agua, escorrentía superficial, erosión de suelo, y muchos otros problemas derivados.

En terreno, se ha verificado que en general hay poco control sobre la presión de trabajo en los laterales de riego, lo que afecta directamente al caudal entregado por los emisores (cintas de riego, goteros, microaspersores, microjets). La sencilla práctica de medir a lo largo de la temporada la presión por medio de un manómetro en los extremos de las laterales de distinta posición topográfica dentro de un sistema de riego, permite detectar a tiempo problemas que pueden determinar pérdidas de agua y de rendimiento del cultivo (**Foto 6**).



Foto 6. Medición de presión en la lateral por medio de un manómetro de glicerina.



En predios de productores de arándano y frutilla en el secano de la Región de O'Higgins, se han registrado presiones de funcionamiento cercanas al 50 – 70% de la presión óptima de funcionamiento del emisor, lo que inevitablemente determina menores caudales entregados por tiempo de funcionamiento del sistema y una baja eficiencia de riego.

En términos de sus componentes, la eficiencia de riego puede definirse como la resultante de la ponderación de tres subaspectos:

- **Eficiencia de aplicación:** determina la fracción de agua no retenida en la zona radical, en relación al agua aplicada en el perfil de suelo.
- **Eficiencia de almacenamiento:** determina la fracción de agua aplicada almacenada en el suelo, en relación a la necesaria, para llevar a capacidad de campo el perfil.
- **Eficiencia de uniformidad:** evalúa el grado de uniformidad de la lámina de riego aplicada en terreno.

La ponderación de estas tres eficiencias, determina la **eficiencia agronómica o de utilización** del agua de riego, cuyo valor debería optimizarse en condiciones de secano. En consecuencia, la eficiencia de riego es una variable dinámica que depende de los factores antes mencionados, sin contar con el mal manejo por parte del regante, derivados de su escasa capacitación o experiencia en el cultivo. De este modo, la eficiencia de utilización fluctúa no sólo a lo largo de la temporada en cada evento de riego, sino que también en cada sector y subsector de riego dentro de un sistema.

El concepto de eficiencia agronómica está definido por la siguiente ecuación:



$$E_a = \frac{E_{ap} + E_{al} + E_u}{3}$$

Ecuación 7

Donde:

 E_a : Eficiencia agronómica E_{ap} : Eficiencia de aplicación E_{al} : Eficiencia de almacenamiento E_u : Eficiencia de uniformidad

2.1. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación es la relación entre el volumen de agua que es necesario reponer en la zona de raíces y el volumen total de agua aplicado al terreno que queda retenida en la zona radical del cultivo y está determinada por la siguiente expresión:

$$E_{ap} = \frac{h_a - h_p}{3}$$

Ecuación 8

Donde:

 E_{ap} : Eficiencia de aplicación h_a : Agua aplicada durante el riego (L)

h_p : Agua no retenida en la zona radical (L) y que por lo tanto, no se encuentra disponible para el consumo por parte de los cultivos

En el **Cuadro 13**, se muestran los valores de eficiencia para algunos sistemas de riego utilizados comúnmente.

Las pérdidas de agua en un sistema de riego por surcos están alrededor del 55%, comparado con un sistema de riego por go-



teo donde las pérdidas pueden alcanzar el 10%, siempre y cuando el mismo se encuentre bien diseñado. Lo anterior queda esquematizado en la **Figura 23**.

Cuadro 13. Eficiencia de aplicación del agua según el método de riego utilizado.

Método de riego	Eficiencia de riego (%)
Tendido	30
Surcos	45
Californiano	65
Aspersión	75
Microjet	85
Microaspersión	85
Goteo	90

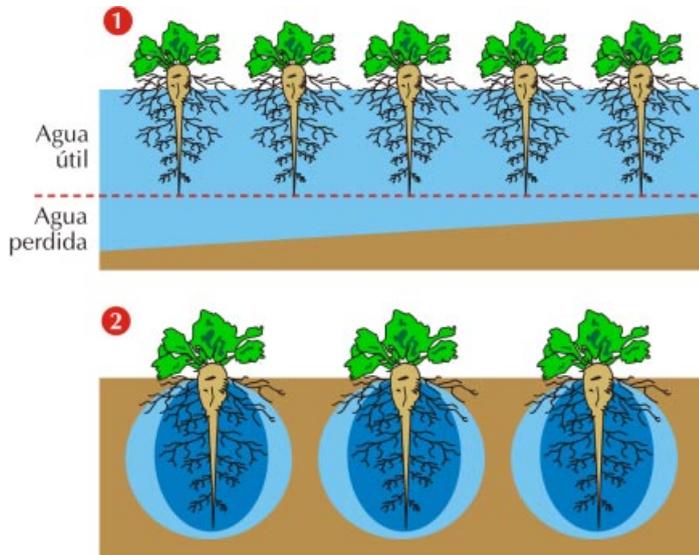


Figura 23. Eficiencia de riego. 1) Riego por surco; 2) Riego por goteo.



Los sistemas de riego localizado tienen eficiencias muy altas, 90% o más, por lo que su uso se ha generalizado en todas aquellas zonas con problemas en la seguridad de riego. Otra ventaja es que todas las plantas reciben la misma cantidad de agua y nutrientes, por lo tanto, se favorecen todas las condiciones para que el cultivo exprese todo su potencial productivo.

Si el riego no es uniforme, algunas zonas recibirán más agua de la necesaria y se perderá por percolación profunda, otras plantas recibirán menos y eso afectará negativamente la productividad de esa planta. Lo anterior se puede observar en la **Figura 24**.

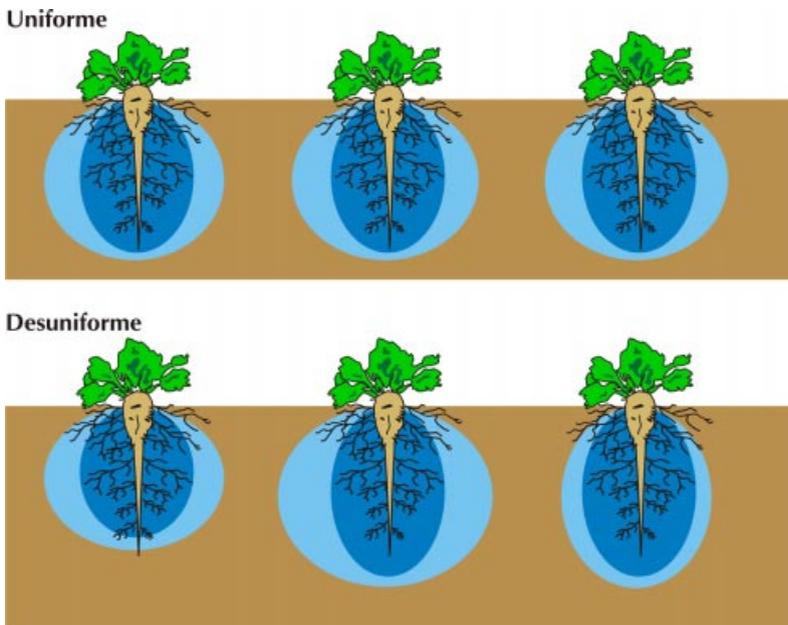


Figura 24. Mojamiento uniforme *versus* mojamiento desuniforme en un sistema de riego presurizado.



Ejemplo 4. Cálculo de la Eficiencia de Aplicación (E_{ap})

Tradicionalmente en frutillas para el período de máxima demanda se recomienda reponer la lámina de agua evapotranspirada el día anterior (riego diario) o bien efectuar un riego al acumularse 10 mm de evapotranspiración del cultivo y reponer esta altura para devolver el suelo a capacidad de campo. Una lámina neta de 10 mm, representa 10 L/m² ó 100 m³/ha de agua. Si un riego aplicado a este cultivo descarga por ejemplo 12 L/m² (h_a), es decir, un exceso de 2 L/m² (h_p) de agua por sobre los 10 L/m² requeridos, esta agua percola más allá de la zona de raíces, representando una ineficiencia en la aplicación del riego, quedando definida por la siguiente relación:

$$E_{ap} = \frac{12 - 2}{12} \times 100 = 83\%$$

De esta forma, la E_{ap} cuantifica la fracción de agua que se retiene en la zona de raíces y que contribuye a satisfacer los requerimientos de evapotranspiración del cultivo. El complemento de esta eficiencia al 100%, equivalente en el ejemplo a un 17% representa a su vez la fracción no retenida en la zona de raíces. Esta fracción de agua tiene implicancias en el transporte de nutrientes y pesticidas a las napas subterráneas, que lentamente pueden lixiviar compuestos nocivos para la salud humana y el ambiente tales como nitratos o glifosatos, por ejemplo.

Se debe tener en cuenta que la eficiencia de aplicación considerada para los distintos métodos de riego (aspersión, goteo, microjet) es sólo teórica, por lo tanto en la práctica estos valores



pueden ser mucho menores a los asignados, ahí la importancia de su determinación *in situ*.

Esta eficiencia se ha definido en base a láminas de agua, que es la forma como se expresa habitualmente la cantidad de agua de riego aplicada a un campo regado.

La lámina de entrada (*ha*) corresponde a la cantidad total de agua que se hace entrar al sector de riego durante el tiempo que dura esta práctica. La lámina de pérdida está representada por dos procesos de flujo:

- a) La cantidad total de agua que sale del sector de riego por escurrimiento superficial y no tiene posibilidad de infiltrar en el perfil.
- b) La cantidad total de agua que sale del sector de riego por percolación bajo la zona de arraigamiento del cultivo y no queda a disposición de las plantas.

Si bien este concepto no indica si el riego es satisfactorio desde el punto de vista de una práctica agronómica (puesto que al agregar un litro de agua a una hectárea de suelo relativamente seco, se tendría una eficiencia de aplicación del 100%, dado que no se producirían pérdidas de ningún tipo), es el parámetro que indica la proporción de la lámina (o volumen) total que se aplica por unidad de superficie, que se utiliza efectivamente para regar el suelo, esto es, para reponer en el perfil del suelo ocupado por las raíces, el agua evapotranspirada desde el evento de riego anterior.

2.2. Eficiencia de almacenamiento

Se define como la relación entre el agua almacenada en el perfil por efecto del riego, y el agua necesaria para llevar dicho perfil a



Capacidad de Campo en toda la profundidad de arraigamiento del cultivo, lo cual se puede determinar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_{al} = \frac{h_{al}}{h_{cc}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

E_{al} : Eficiencia de almacenamiento.

h_{al} : Agua almacenada en la zona de las raíces al finalizar el riego

h_{cc} : Agua requerida para que el perfil del suelo quede a capacidad de campo hasta la profundidad de raíces.

Ejemplo 5.

Cálculo de la Eficiencia de Almacenamiento (E_{al})

Volviendo al ejemplo de riego en frutillas, se requiere reponer una altura de agua de 10 mm, para devolver el suelo a capacidad de campo (h_{cc}). Si una vez efectuada la labor de riego se verifica que el agua almacenada en el perfil de suelo equivale a 8 mm (h_{al}), la eficiencia queda determinada de acuerdo a la siguiente relación:

$$E_{al} = \frac{8}{10} \times 100 = 80\%$$

Para un suelo con una velocidad de infiltración determinada, la lámina de agua almacenada en su perfil dependerá del tiempo de riego. La lámina necesaria para llevar el perfil hasta la profundidad de arraigamiento del cultivo, a un contenido de agua equivalente a capacidad de campo (CdC), depende también del contenido de agua del suelo antes del riego.



En este caso, tampoco una eficiencia de almacenamiento del 100% indica un riego adecuado, ya que es posible llevar el perfil del suelo hasta capacidad de campo, pero con una pérdida por escurrimiento superficial y/o por percolación profunda.

2.3. Eficiencia de uniformidad

Se define como la relación entre el promedio de las láminas almacenadas en el perfil del suelo a lo largo del campo regado, y la desviación de dicho promedio, para un número específico de muestreos (**ecuación 10**).

$$E_u = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - \bar{X}|}{n \times \bar{X}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- E_u : Eficiencia de Uniformidad (%)
- \bar{X} : Promedio de caudales registrados (l/h)
- $|X_i - \bar{X}|$: Valor absoluto de la desviación de las observaciones individuales con respecto al promedio de caudales registrados
- n : número de observaciones

En la práctica del riego es muy importante que la distribución del agua en la zona de raíces sea uniforme, ya que la respuesta de distribución desigual da lugar a que el terreno presente excesos de agua en algunas partes y déficit en otras.

Para determinar la eficiencia de uniformidad se debe elegir un número determinado de emisores distribuidos uniformemente dentro del sector de riego, se recomienda muestrear sobre 16 emisores por sector.



Primero se eligen los laterales de los extremos y dos de la parte media ubicados en el primer y segundo tercio del sector. Se sigue la misma consideración para la elección de los emisores dentro de los laterales seleccionados, de acuerdo a la **Figura 25**.

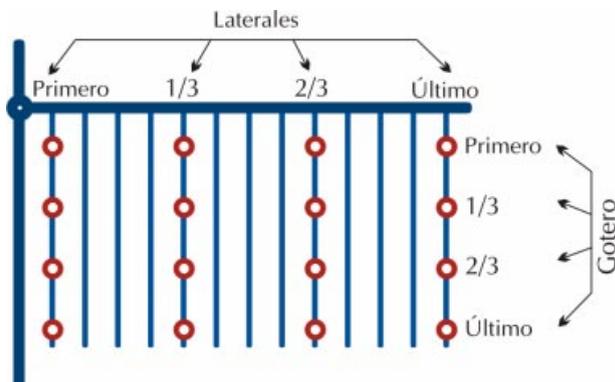


Figura 25. Elección de emisores a muestrear para la determinación de la E_u .

Una vez seleccionados los emisores a muestrear, en un envase, se medirá el gasto de cada gotero, en un tiempo determinado, de 2 a 5 minutos (**Foto 7**).



Foto 7. Muestreo del gasto de emisores.



El tiempo de medición será el mismo para todos los goteros muestreados (**Foto 8**).

Con un recipiente graduado se medirá el volumen contenido por cada envase (**Foto 9**).



Foto 8. Registro del tiempo de medición.



Foto 9. Medición de caudales muestreados.

Con los datos obtenidos de cada muestra se realizan los cálculos aplicando la **ecuación 10**. En el **Cuadro 14**, se presenta la clasificación para los diferentes valores de Eficiencia de Uniformidad.

Cuadro 14. Clasificación de la Eficiencia de Uniformidad de acuerdo a diferentes intervalos de valores.

Categoría	Valor E_u (%)
Excelente	90 – 100
Buena	80 – 90
Aceptable	70 – 80
Inaceptable	Menos de 70



Ejemplo 6. Cálculo de la Eficiencia de Uniformidad (E_u)

Continuando con los ejemplos planteados con anterioridad, se tienen 2 sectores de riego muestreados, donde se registraron los caudales de 10 emisores por sector y la presión promedio de los laterales de riego por sector, los resultados se presentan a continuación:

Nº gotosos	SECTOR 3		SECTOR 8	
	Q (L/h)	$ X_i - \bar{X} $	Q (L/h)	$ X_i - \bar{X} $
1	3,0	0,08	2,4	0,68
2	3,0	0,08	2,4	0,68
3	3,3	0,22	3,6	0,52
4	3,6	0,52	3,0	0,08
5	3,0	0,08	2,1	0,98
6	3,0	0,08	3,6	0,52
7	1,8	1,28	2,1	0,98
8	3,8	0,70	4,8	1,72
9	3,0	0,08	2,1	0,98
10	3,3	0,22	3,6	0,52
X	3,1		2,97	
$\sum_{i=1}^n X_i - \bar{X} $	3,3		7,7	
E_u (%)	89		74	
Presión (bar)	0,78		0,76	
Q nominal		4 (L/h)		

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la eficiencia de uniformidad del sistema en cuestión, se puede clasificar como BUENA para el Sector 3, y ACEPTABLE para el Sec-



tor 8. Promediando la E_u de ambos sectores se obtiene un 82%, clasificándose como BUENA para el sistema en general.

Al respecto, se debe prestar especial atención al caudal (Q) nominal de los emisores utilizados y compararlo con el promedio obtenido de las evaluaciones realizadas, ya que una óptima eficiencia de aplicación no asegura que se estén descargando los caudales asegurados por catálogo, por lo cual el registro de presiones en las laterales de riego será un parámetro que podrá explicar las posibles diferencias entre el caudal real y el caudal nominal de los emisores. Además, la magnitud en la diferencia de caudal teórico y real, estará determinada por el tipo de emisores utilizados, sean estos de tipo turbulento o autocompensados; y por la presión de trabajo requerida por emisor.

En los casos evaluados, al comparar el caudal promedio por sector y el caudal nominal de los emisores utilizados se presenta una situación que contrasta con la eficiencia calculada. Aunque la E_u está dentro de los márgenes óptimos en todos los casos, se debe prestar especial atención a los caudales descargados, presiones existentes en los laterales de riego, presión de trabajo de los emisores y tipo de emisores (convencionales o autocompensados).

En el presente ejemplo los caudales promedios descargados por sector se encuentran muy por debajo del caudal nominal de los emisores utilizados que corresponden a 4 L/h, lo cual puede ser debido a una falta de presión en los laterales de riego.

Para finalizar a continuación se presenta un ejemplo con el cálculo de la Eficiencia Agronómica:



Ejemplo 7. Cálculo de la Eficiencia Agronómica (E_a)

Una vez determinados los componentes de la Eficiencia Agronómica, se aplica la **ecuación 7**, obteniéndose:

$$E_a = \frac{83 + 80 + 82}{3} = 81,67\%$$

Por lo tanto, el sistema de riego evaluado, de acuerdo a los ejemplos planteados, posee una Eficiencia Agronómica de 81,67%.



PRINCIPIOS BÁSICOS DE FERTIRRIGACIÓN

Juan Hirzel C.

Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Dr.

INIA Quilamapu

1. INTRODUCCIÓN

La fertirrigación es una técnica compleja y eficiente, insustituible en sistemas con riego localizado de alta frecuencia, que se basa en el entendimiento de que las plantas utilizan agua y nutrientes en forma diaria, de manera continua y creciente a medida que avanza su ciclo de desarrollo, por lo tanto, de la misma forma se debe aplicar el agua y nutrientes, lo cual respetará su metabolismo y potenciará su productividad.

Para su desarrollo es necesario disponer de los elementos y materiales suficientes que permitan la incorporación de soluciones nutritivas en el agua de riego en forma precisa. Al respecto, actualmente es posible encontrar una amplia gama de elementos para fertirrigación, sin embargo, la elección del más adecuado a las condiciones particulares de cada instalación repercutirá en una mayor eficiencia de los fertilizantes aportados, optimizando su potencial de producción.



Los métodos de inyección se pueden agrupar en tres principales, que son los más utilizados:

- Inyección por succión de la bomba
- Inyector tipo venturi
- Inyección con Bomba independiente

De acuerdo con los principios de diseño y operación de los sistemas de riego localizado, el suelo no se moja en su totalidad, al ser menor el volumen de suelo mojado, el volumen radical se restringe, por lo que estos sistemas se operan con la frecuencia necesaria para mantener la humedad del suelo a un nivel adecuado para un cultivo en particular. Se suministran los fertilizantes a través del agua de riego, siguiendo tres criterios:

- 1) Aplicar solución nutritiva en concentraciones variables dependiendo de las necesidades del cultivo
- 2) Aplicar los nutrimentos en forma fraccionada de acuerdo con las necesidades del cultivo según la etapa fenológica en que se encuentre
- 3) Definir la dosis total de aplicación y dividirla de acuerdo con el número de aplicaciones.

Cualquiera de los tres criterios tiene como objetivo aplicar las dosis de nutrimentos mínimas necesarias para obtener los máximos rendimientos y evitar, en lo posible, el deterioro del suelo por el incremento de la salinidad y la lixiviación de nutrientes.

Además de la aplicación de fertilizantes a través del agua de riego, es posible aplicar otros tipos de productos químicos como herbicidas, insecticidas, fumigantes de suelo, acondicionadores de suelo (enmiendas) y compuestos que permitan el buen fun-



cionamiento de los sistemas de riego presurizado en el tiempo, proceso denominado quemigación.

Los componentes necesarios para realizar una correcta fertirrigación son los siguientes:

- 1) Al menos un estanque para la preparación de la solución madre (solución concentrada del fertilizante).
- 2) Un sistema de inyección (Venturi, bomba inyectora) y un medidor de flujo (Caudalímetro) para la solución madre.
- 3) Válvulas adicionales que permitan la puesta en marcha y el cierre del sistema de inyección.
- 4) Sistemas de filtros que aseguren el paso de una solución de riego con partículas de tamaño fino (filtros de arena y malla). Así se evita el tapado de los goteros

Entre las ventajas que presenta la aplicación de fertilizantes a los cultivos por medio de un sistema de riego, se encuentran las siguientes:

- Mayor eficiencia en el uso de los fertilizantes, ya que una gran parte del fertilizante aplicado es utilizado efectivamente por la planta, existiendo una mejor distribución del producto, incrementándose la eficiencia del uso del fertilizante y reduciendo su impacto ambiental.
- Facilidad de adaptar la cantidad y concentración de un nutriente específico respecto a los requerimientos de las diferentes etapas de desarrollo del cultivo (crecimiento vegetativo, floración o cuajado).
- Ahorro de trabajo y comodidad. Se requiere menos mano de obra en la aplicación de fertilizantes.
- Reducción de la compactación del suelo, al no ingresar maquinaria al predio.



- Posibilidad de utilizar fertilizantes líquidos.
- Reducida fluctuación de la concentración de nutrientes en el suelo a través de la estación de crecimiento.
- Automatización de la fertilización.

Entre los posibles inconvenientes del sistema podemos citar:

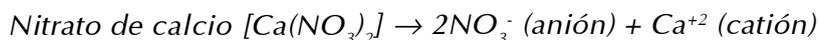
- Costo inicial de la infraestructura
- Obturación de goteros
- Necesidad de manejo del sistema por personal especializado

2. LOS FERTILIZANTES EN EL SUELO

Se conoce como fertilizante a una sustancia que se agrega al suelo para suministrar aquellos elementos que se requieren para la nutrición de las plantas. Un material fertilizante es una sustancia que contiene uno o más de los elementos esenciales para las plantas. Los fertilizantes completos contienen los tres macronutrientes para las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio. Al respecto, en el siguiente cuadro se presentan los elementos esenciales para la nutrición de las plantas y su descripción.

Todos los compuestos químicos, en este caso los fertilizantes, cuando son aplicados al suelo se disocian en cationes (de carga positiva) y aniones (de carga negativa) y posteriormente son absorbidos por las plantas (**Cuadro 15**).

Por ejemplo:



**Cuadro 15.** Elementos esenciales para las plantas.

Elemento	Símbolo	Forma de absorción	Concentración en plantas sanas (% de peso seco)
Macronutrientes			
Nitrógeno	N	NO_3^- ; NH_4^+	1-4 %
Fósforo	P	HPO_4^{-2} ; H_2PO_2^-	0,1-0,8 %
Potasio	K	K^+	0,5-6 %
Azufre	S	SO_4^{-2}	0,05-1 %
Magnesio	Mg	Mg^{+2}	0,1-0,8 %
Calcio	Ca	Ca^{+2}	0,2-3,5 %
Micronutrientes			
Boro	B	BO_3^{-2} ; HBO_3^-	5-75 ppm
Hierro	Fe	Fe^{+2} ; Fe^{+3}	25-300 ppm
Manganeso	Mn	Mn^{+2}	15-800 ppm
Molibdeno	Mo	MoO_4^-	0,1-5,9 ppm
Cobre	Cu	Cu^{+2}	4-30 ppm
Zinc	Zn	Zn^{+2}	15-100 ppm
Cloro	Cl	Cl^-	100-10.000 ppm
Sodio	Na	Na^+	trazas

Se debe mencionar que existen fertilizantes formadores de ácido los cuales son capaces de aumentar la acidez del suelo. Los fertilizantes básicos o alcalinos disminuyen la acidez del suelo, mientras que los fertilizantes neutros o no formadores de ácidos son aquellos que no aumentan ni disminuyen el pH al ser agregado a un suelo.

Al respecto, el pH del suelo afecta la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, de acuerdo a la **Figura 26**.

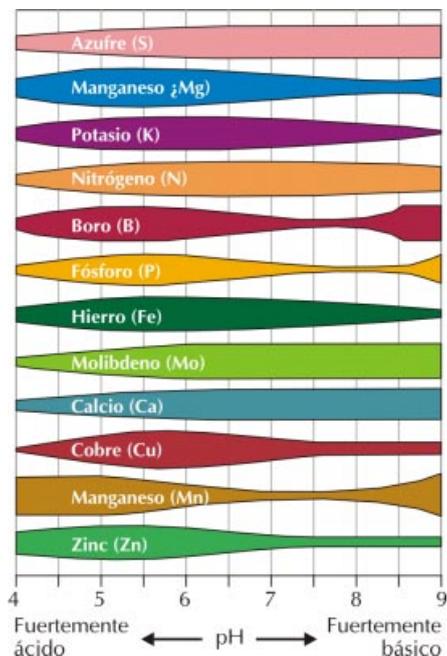


Figura 26. Forma en que el pH afecta a la disponibilidad de los nutrientes minerales.

En la figura anterior, la anchura de cada banda nos indica la disponibilidad de dicho elemento para las raíces. Por ejemplo, en el caso del Nitrógeno, este se encuentra totalmente disponible para las plantas a partir de un pH 5,5 a 7,5; así, queda de manifiesto que el pH es uno de los principales responsables en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la menor o mayor asimilabilidad de los diferentes nutrientes. Considerando en conjunto los efectos producidos por los diferentes valores de pH en cuanto a la absorción de los nutrientes, puede decirse que el pH “ideal” se encuentra entre 6 y 7.

En zonas húmedas los valores se encuentran entre 5 y 7, debido a que las precipitaciones producen un lavado de las sales del suelo, llevándose los elementos más allá de la zona de raíces, tendiendo el suelo a la acidez; por otro lado, en zonas áridas los valores de pH se encuentran entre 7,5 y 9 debido a que no existe lavado de sales, acumulándose estas en superficie.

Al respecto, la adición de fertilizantes al suelo aumenta la salinidad del mismo, la cual se expresa como Conductividad Eléctrica (C.E), por lo cual se debe tener especial cuidado con los



valores que alcanza el extracto de saturación del suelo, a la cual las plantas presentan diferentes niveles de tolerancia. A continuación en el **Cuadro 16**, se presenta la tolerancia de hortalizas y frutales a la salinidad:

CUADRO 16. Tolerancia de diversas especies vegetales a la salinidad y su relación con el rendimiento.

Especie vegetal	C.E. (mmhos/cm) a la cual el rendimiento disminuye		
	10%	25%	50%
Remolacha	8	10	12
Espinaca	5,5	7	9
Tomate	4	6	8
Brócoli	4	6	8
Zapallo y melón	3	4	6
Papas	3	4	6
Olivo	2,7	n.d.	8,4
Maíz	2,5	4	6
Lechuga	2	3	5
Pepino	2	3	5
Ajo	2	3	4
Zanahoria	1,5	2	4
Manzano y peral	1,7	n.d.	4,8
Cítricos	1,7	n.d.	4,8
Vid	1,5	n.d.	6,7
Cerezos y guindos	1,5	n.d.	n.d.
Frambuesa	1,5	2	2,5
Frutilla	1,5	2	2,5
Palto	1,3	n.d.	3,7

n.d. = no determinada.



3. FERTILIZANTES UTILIZADOS EN FERTIRRIGACIÓN

Para utilizar un fertilizante a través de la fertirrigación es necesario conocer la composición de los productos y su solubilidad en el agua.

La solubilidad es la capacidad de disolución de un producto en el agua de riego, la cual varía según la temperatura del agua, resultando que a mayor temperatura, mayor solubilidad. Existen productos muy solubles o que se disuelven muy bien en agua, como es el caso de la Urea, Nitrato de Calcio y Nitrato de Potasio; otros son medianamente solubles como el Cloruro de Potasio, Fosfato Diamónico y Nitrato de Amonio; y finalmente existen productos menos solubles como el Sulfato de Calcio (yeso), el Superfosfato Triple, el Superfosfato Normal y Sulfato de Hierro.

La combinación de dos o más fertilizantes puede hacer menos soluble el producto final. Al respecto, los productos de baja solubilidad o menos solubles, no deben ser utilizados en fertirrigación.

El **Cuadro 17**, registra valores de solubilidad de los principales fertilizantes utilizados en fertirrigación, además de otras características importantes.

De acuerdo a normas internacionales, el nombre de cada compuesto va seguido de un paréntesis con tres números. El primero indica el contenido de Nitrógeno (N) en porcentaje; el segundo indica el contenido de Fósforo (P) en la forma de P_2O_5 (%); y el tercero el contenido de Potasio (K) en la forma de K_2O (%).



Cuadro 17. Características de los principales fertilizantes usados en fertirrigación.

Tipo	Composición N-P-K	Solubilidad (g/L)	Reacción
Fertilizantes Nitrogenados			
Nitrato de Amonio	34-0-0	183	Neutra (pH:6,5-7)
Sulfato de Amonio	21-0-0	710	Mod. ácida (pH:5)
Nitrato de Calcio	15,5-0-0	1.020	Neutra (pH:6,5)
Nitrato de Sodio	16-0-0	730	
Urea Perlada	46-0-0	1.000	Alcalina (pH:8,5-9)
Fertilizantes Fosfatados			
Acido Fosfórico	0-52-0	457	Acida (pH:2,5)
Fosfato Monoamónico	11-11-0	230	Mod. ácida (pH:3,5)
Fosfato diamónico	21-11-0	430	Alcalina (pH:8)
Súper fosfato normal	0-5-0	20	Acida (pH: 2-3)
Súper fosfato doble	0-10-0	40	
Fertilizantes Potásicos			
Cloruro de Potasio	0-0-60	347	
Nitrato de Potasio	13-0-44	133	Neutra (pH:7,0)
Sulfato de Potasio	0-0-50	120	Acida (pH:3,2)
Solubilidad de los principales fertilizantes usados en fertirrigación			
Micronutrientes			
Sulfato de Cobre	25% Cobre	316	
Cloruro cúprico		710	
Sulfato de calcio	23% Calcio	2,41	
Sulfato de fierro	20% Fierro	157	
Sulfato de Magnesio	9,7% Magnesio	710	
Sulfato de Manganeso	27% Manganeso	1.053	
Sulfato de zinc	36% Zinc	750	
Fe-EDDHA	6% Fierro	90	
Fe-DTPA	10% Fierro	220	



Tomemos como ejemplo el Nitrato de Calcio (**Figura 27**). Su composición se presenta de la siguiente forma: **[15,5-0-0]**, lo que indica un contenido de Nitrógeno de 15,5%, Fósforo 0% y Potasio 0%, es decir, este fertilizante contiene 15,5 unidades de Nitrógeno y no contiene Fósforo ni Potasio.

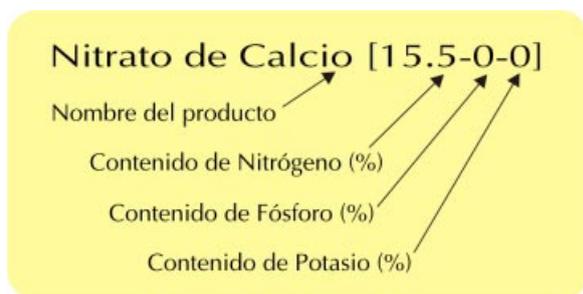


Figura 27. Descripción de la composición de los fertilizantes.

4. COMPATIBILIDAD DE LOS FERTILIZANTES

Los fertilizantes son sales, que en contacto con el agua se disocian formando iones (aniones y cationes); diferentes iones pueden interactuar en la solución y precipitar (formando compuestos insolubles), con el consiguiente riesgo de no estar disponibles para las raíces o con alto riesgo de taponar emisores, disminuyendo consecuentemente la eficiencia de aplicación de los nutrientes.

Al respecto, cuando se mezclan fuentes de fertilizantes simples, el primer aspecto que debe considerarse es que los ingredientes de la mezcla sean químicamente compatibles (**Cuadro 18**).

Cuadro 18. Compatibilidad de los fertilizantes solubles utilizados en fertirriego.

FERTILIZANTES	Urea	Nitrato de Amonio	Sulfato de amonio	Nitrato de Calcio	Nitrato de magnesio	Fosfato monoamónico	Fosfato monopotásico	Nitrato de potasio	Sulfato de potasio	Cloruro de potasio	Ácido fosfórico	Ácido nítrico	Ácido sulfúrico	Sulfatos Fe, Cu, Mn, Zn	Quelatos
Nitrato de Amonio	C														
Sulfato de amonio	I	C													
Nitrato de Calcio	C	C	I												
Nitrato de magnesio	C	C	C	C											
Fosfato monoamónico	C	C	C	I	I										
Fosfato monopotásico	C	C	C	I	I	C									
Nitrato de potasio	C	C	R	C	C	C	C								
Sulfato de potasio	C	C	R	I	I	C	C	C							
Cloruro de potasio	C	C	C	I	C	C	C	C	R						
Ácido fosfórico	C	C	C	I	I	C	C	C	C	C					
Ácido nítrico	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C				
Ácido sulfúrico	C	C	C	I	I	C	C	C	R	C	C	C			
Sulfatos Fe, Cu, Mn, Zn	C	C	C	I	I	I	C	C	R	C	C	C	C		
Quelatos	C	C	C	R	R	R	C	C	C	C	R	I	C	C	
Sulfato de Magnesio	C	C	C	I	I	I	C	C	R	C	C	C	C	C	C

C: Compatible, R: Se reduce la solubilidad, I: Incompatible.





Las interacciones más comunes de incompatibilidad son:

- $\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2} = \text{CaSO}_4$ (precipitado).
- $\text{Ca}^{+2} + \text{HPO}_4^{-2} = \text{CaHPO}_4$ (precipitado).
- $\text{Mg}^{+2} + \text{SO}_4^{-2} = \text{MgSO}_4$ (precipitado).

Los micronutrientes por otro lado, pueden reaccionar con las sales del agua de riego formando precipitados, por lo tanto, es recomendable aplicarlos en forma quelatada.

De acuerdo al Cuadro 18, las siguientes mezclas **NO** se deben realizar:

- Fertilizantes Fosforados con Fertilizantes Cálcidos.
- Fertilizantes Fosforados con Fertilizantes Magnésicos.
- Fertilizantes Cálcidos con algún Sulfato.
- Microelementos no Quelatados (Fierro) con Fertilizantes Fosforados en medios ácidos.

Si se aplica ácido, este se debe aplicar antes que los fertilizantes. El ácido se aplica sobre el agua, lentamente (nunca hay que aplicar agua sobre el ácido). En seguida se aplican los fertilizantes, partiendo de los menos solubles. Se recomienda realizar la mezcla de fertilizantes en la mitad del volumen de agua a utilizar. Agitar vigorosamente y luego agregar agua hasta completar el volumen total de agua.

Al preparar la Solución Madre (concentrada) puede aparecer un sobre nadante (producto flotante) o parte del producto sin disolver, lo cual indica que se sobrepasó la solubilidad del fertilizante.



5. EL AGUA DE RIEGO Y EL FERTIRRIEGO

Consideraciones de la relación sistema radical - suelo en fertirrigación con riego de alta frecuencia.

- Se ocupa sólo un 30 - 40% del volumen total del suelo.
- El aporte de nutrientes por el suelo es mucho menor. Se debe considerar el aporte del agua.
- El sistema radical está expuesto continuamente a un suministro de sales.
- Las sales que ingresan al bulbo húmedo difícilmente son desplazadas a gran distancia del sistema radical. El lavado de sales se realiza con riegos largos sin fertilizante.

Independiente de la fuente (superficial o subterránea), la calidad del agua de riego es un término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación del empleo del agua con fines de riego para los cultivos, para cuya determinación generalmente se toman las características químicas.

La calidad del agua depende de sus características físicas y químicas, y también de los problemas potenciales que pueden generar a los cultivos, a los suelos y al sistema de riego, dando lugar al uso condicionado del agua de riego, dependiendo del cultivo y del suelo específico que se trate (**Cuadro 19**).



Cuadro 19. Rangos deseables de algunos parámetros y elementos en el agua de riego.

Elemento	Concentración en el agua de riego
C. E (mmhos/cm)	0,2 - 1,0
pH	6,5 - 7,0
Nitrato (ppm)	0,0 - 5,0
Fósforo (ppm)	0,005 - 5,0
Potasio (ppm)	0,5 - 10,0
Calcio (ppm)	40 - 120,0
Magnesio (ppm)	6,0 - 24,0
Fierro (ppm)	2,0 - 5,0
Boro (ppm)	0,0 - 0,3
Cloruros (meq/l)	0,2 - 1

C. E: Conductividad Eléctrica.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de aporte de nutrientes en el agua de riego:

Ejemplo 8.

Cálculo de aporte de nutrientes por el agua de riego.

En un cultivo de lechuga al aire libre regado por cintas se aplican 3.000 m³ de agua de riego con una concentración de 10 ppm de N (NO₃⁻) y 35 ppm de Calcio.

ppm: Partes por millón.
1 ppm = 1 mg/Kg = 1 mL/L

¿Cuál es el aporte de estos nutrientes por ha?.

- **N (NO₃⁻)** : 10 ppm = 10 mg/L = 10 g/m³ = 0,01 Kg/m³
 0,01 Kg/m³ x 3.000 m³ = **30 Kg de N/ha**
- **Calcio** : 35 ppm = 35 mg/L = 35 g/m³ = 0,035 Kg/m³
 0,035 Kg/m³ x 3.000 m³ = **105 Kg de Ca/ha**



6. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

La solución de riego debe obedecer a un rango de pH (entre 5,5 - 6,5) y Conductividad eléctrica (idealmente menor a 1,5 mmhos/cm) para asegurar la completa disponibilidad de nutrientes y una concentración de sales que no provoque daños al cultivo. Para este efecto se debe conocer la ficha técnica de cada fertilizante a usar (solubilidad, pH y C.E. a distintas concentraciones, grado de pureza), o disponer de un pH-metro y Conductivímetro.

Al preparar la Solución Madre se debe tener cuidado de no mezclar productos que precipiten. Lo ideal es trabajar con productos formulados como mezclas N-P-K desde fábrica, que aseguren el buen funcionamiento del sistema.

Los pasos para preparar una solución fertilizante, son los siguientes:

- 1) Determinar la demanda del cultivo.
- 2) Calcular la proporción de los diferentes fertilizantes a utilizar, de acuerdo al requerimiento de nutrientes para el periodo (según fenología).
- 3) Suministro del suelo.
- 4) Calidad agua de riego.
- 5) Verificar la compatibilidad de los fertilizantes disponibles.
- 6) Verificar la solubilidad y preparación solución madre.
- 7) Calcular la Conductividad Eléctrica resultante.
- 8) Conocer la acidez (pH) resultante.
- 9) En el caso de ser necesario calcular la cantidad de ácido requerida para neutralizar los bicarbonatos o para bajar el pH.
- 10) Concentración agua de riego.
- 11) Calcular la tasa de inyección.



Una vez determinado el tipo de fertilizante y la cantidad a emplear de acuerdo al cultivo (**Cuadro 20**), se prepara la solución en un balde, siguiendo los pasos que a continuación se detallan:

- Agregue agua a un balde o estanque hasta la mitad del total de solución a preparar.
- Adicione el fertilizante.
- Agite vigorosamente hasta que todo el producto se disuelva.
- Agregue agua hasta completar el volumen deseado y agite nuevamente.
- Inyecte la solución al sistema de riego.

Cuadro 20. Necesidades nutricionales de diversas especies hortícolas.

Especie	Nutrientes (Kg/ha)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	MgO	CaO
Frutales en formación	95	49	79	7	4	30
Vides (1ª temporada)	78	32	32	7	10	30
Vides (plena producción)	69	36	156	17	2	25
Uva de mesa (producción)	130	42	301	40	17	60
Palto en producción	285	93	193	45	15	52
Carozos en producción	132	62	242	27	14	76
Cítricos en producción	464	100	335	53	31	130
Pomáceas en producción	202	70	251	19	3	104
Olivos en producción	204	128	231	30	36	104
Frutales de nuez	115	84	153	2	10	24
Kiwi en producción	146	64	229	11	3	88
Frutilla (primavera-verano)	167	112	160	20	17	72
Hortalizas solanáceas	259	162	348	10	21	109

Nota: Se debe dividir los requerimientos de acuerdo a etapa fenológica del cultivo.

Idealmente se recomienda tener 4 estanques para preparar las disoluciones de fertilizantes, dependiendo de los elementos a inyectar:



- **Estanque 1:** N – P – K
- **Estanque 2:** Ca – Mg
- **Estanque 3:** Microelementos (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo).
- **Estanque 4:** Ácidos (nítrico, fosfórico, sulfúrico, clorhídrico).

6.1. Concentración de fertilizantes en el agua de riego

Para obtener el mayor beneficio del sistema es aconsejable aplicar fertilizantes en cada riego. Esta práctica permite trabajar con concentraciones finales muy bajas en la solución de fertirriego que llega a las plantas, con lo cual se evitan los riesgos de toxicidad por exceso de sales, o de sobrepasar la solubilidad de los fertilizantes.

La solución final de fertirrigación debe cumplir con dos características esenciales:

- Conductividad eléctrica (C.E.) menor a un valor determinado (medida con un Conductímetro, u obtenida de la ficha técnica del fertilizante soluble).
- pH entre 5,5-6,5.

La C.E. es una propiedad que tienen las soluciones de agua con sales disueltas, que dice relación con la capacidad de conducir la electricidad, siendo mayor cuando aumenta la cantidad de sales disueltas. En la medida que la C.E. aumenta, las plantas se harán más susceptibles a sufrir daños por exceso de sales. Así, la C.E. permite tener una idea de la calidad del agua que será entregada a las plantas. Para obtener la C.E. de la solución que se usará en fertirrigación se debe contar con los antecedentes técnicos del producto a usar en una concentración determinada y luego su-



mar la C.E. del agua (determinada por análisis de agua). En el **Cuadro 21**, se indican antecedentes de C.E. de diversos fertilizantes usados en fertirrigación, para una concentración final (que llega a los emisores) de 1 gramo por litro de agua. Otro antecedente a considerar es la C.E. máxima tolerable por cada cultivo, frente a la cual el rendimiento puede ser afectado (ver cuadro 16).

Cuadro 21. Características técnicas de fertilizantes usados en fertirrigación.

Fertilizante	Solubilidad a 20°C (g/L*)	C.E. a 1 g/L* (mmhos/cm)	pH en solución a 1 g/L*
Nitrato de amonio	1.870	0,9	5,6
Urea	1.080	0,07	5,8
Sulfato de amonio	760	2,1	5,5
Nitrato de potasio	310	1,21	7
Nitrato de calcio	1.220	n.d.	n.d.
Nitrato de magnesio	2.250	0,88	5,6
Fosfato monoamónico	400	0,86	4,7
Fosfato monopotásico	230	0,72	4,8
Sulfato de potasio	120	1,4	7,1

* = se considera el uso de agua destilada.
n.d. = no determinado.

El pH de la solución entrega un índice de la disponibilidad de los nutrientes entregados. Así por ejemplo, cuando el pH es mayor a 7,0 disminuye la disponibilidad de microelementos. Por otra parte, cuando el pH es inferior a 5,0 baja la disponibilidad del fósforo, potasio, calcio y magnesio.

La realización de mezclas fertilizantes, ya sea usando uno o más estanques, entregará un valor de C.E. y de pH de la solución final de fertirrigación. Si la C.E. (medida con conductímetro) supera el valor límite indicado para algún cultivo específico, será necesario disminuir la dosis de solución madre inyectada, hasta al-



canzar un valor adecuado. En el caso del pH, normalmente al realizar mezclas en solución, el valor comienza a aumentar, pudiendo ser mayor a 7,0, por lo cual es necesario inyectar ácidos (nitríco, fosfórico, sulfúrico, clorhídrico) en alguna concentración determinada que permita obtener un pH dentro del rango óptimo.

Además de la preparación de mezclas a nivel de campo, existe la posibilidad de usar mezclas comerciales, las cuales tienen las siguientes ventajas:

- Pueden contener una amplia cantidad de elementos compatibles entre sí.
- Las fuentes fertilizantes usadas en la elaboración de cada mezcla cumplen con ciertas características de calidad.
- Cada producto cuenta con una ficha técnica que indica; solubilidad en agua a una temperatura dada, pH y C.E. a cierta concentración.
- El pH logrado en solución se encuentra dentro del rango óptimo para la mayoría de los cultivos.
- El sistema de fertirrigación implementado podría contar con sólo un estanque para preparar soluciones madres.
- La aplicación de fertilizantes que contengan Calcio y Magnesio se puede realizar en riegos separados, o durante los mismos riegos, siempre que se preparen en un segundo estanque.
- Se facilita la práctica de fertirrigación, puesto que se evita la preparación de mezclas.

En cada cultivo se puede usar la mezcla comercial más adecuada por etapa fenológica.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de concentración de fertilizante en el agua de riego:



Ejemplo 9.

Cálculo de concentración de fertilizante en el agua de riego.

Se plantean las siguientes características para una temporada (6 meses):

- Cultivo: Tomates en invernadero.
- Área invernadero: 300 m²
- Plantas por nave: 200
- Goteros/planta: 1 gotero por planta.
- Caudal Goteros: 4 L/hora.
- Riego: 6 riegos por semana.
- Tiempo de riego: 2 horas (144 riegos por temporada).
- Aplicación fertilizantes: 120 Kg por temporada.

1º Determinar el requerimiento total de agua para la temporada:

$$\text{Agua total} = \text{NDG} \times \text{Caudal} \times \text{TR} \times \text{RT} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

Agua Total : agua total aplicada en la temporada (L).

NDG : Número de goteros por cuartel o sector de riego.

Caudal : caudal de los goteros (L/h).

TR : Tiempo de riego (horas).

RT : Número de riegos por temporada.

Aplicando la ecuación antes descrita se tiene:

$$\text{Agua total} = 200 \times 4 \times 2 \times (6 \times 4 \times 6) = 230.400 \text{ litros}$$

2º Determinar la concentración final:

$$\text{Concentración final} = \frac{\text{Kg fertilizante}}{\text{Agua total}} \quad \text{Ecuación 12}$$



Si se aplican 120 Kg de fertilizantes, distribuidos en todos los riegos, la concentración final de fertilizantes en el agua de riego sería la siguiente:

$$\text{Concentración} = \frac{120 \text{ Kg}}{230 \text{ m}^3} = \frac{120.000 \text{ gramos}}{230.000 \text{ litros}} = 0,52 \text{ g/L}$$

Al respecto, la **Concentración Máxima** de fertilizantes a aplicar en cada riego durante la temporada de crecimiento dependerá del estado fenológico y de la especie, pero en general se sugieren valores inferiores a los siguientes:

- Crecimiento inicial : Concentración < 0,3 g/L
- Desarrollo intermedio : Concentración < 0,5 g/L
- Producción : Concentración < 1 - 2 g/L

6.2. Inyección de Fertilizantes

En muchos casos, el éxito de los programas de fertirrigación no depende del tipo de sistema de inyección empleado, sino de una calibración adecuada, ya que el uso no controlado puede sobrepasar las concentraciones límites de sales en el agua de riego, o simplemente no cumplir con los tiempos de aplicación adecuados, quedando residuos al interior de las tuberías.

Generalmente la solubilidad de las mezclas comerciales es de un 20 - 30%, lo cual significa que se pueden disolver fácilmente 20 - 30 Kg de fertilizante en un estanque de 100 litros (solución madre). La cantidad a inyectar (Tasa de Inyección) de una solución madre dependerá de los siguientes factores:

- 1) Concentración final que se quiera alcanzar (g/L).
- 2) Caudal de riego (bomba o emisores) (L/s).
- 3) Concentración de la solución madre (Kg/L).



El tiempo de inyección de fertilizantes también puede variar. Normalmente, el riego se inicia entregando solamente agua, con lo cual se consigue lavar las sales del suelo que pueden haber quedado como exceso del riego anterior. Posteriormente se comienza a inyectar la dosis de fertilizante calculada para ese evento. Una vez terminada la inyección del fertilizante se debe dar un tiempo de rezago sólo con agua, permitiendo así una limpieza de cañerías y emisores.

La **Tasa de Inyección** se calcula por la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de inyección} = \frac{[\text{Fertilizante}] \times 6}{CR \times [SM]} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

Tasa de Inyección : Caudal de Solución Madre a inyectar al sistema (L/min).

Fertilizantes : Concentración a alcanzar del fertilizante (g/L).

CR : Caudal de riego (L/s).

SM : Concentración de la Solución Madre (Kg/L).

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de **Tasa de Inyección**

Ejemplo 10. Cálculo de Tasa de Inyección

Se prepara una solución madre concentrada al 20% (20 Kilos de fertilizante en 100 Litros de agua = 0,2 Kg/L).

El Caudal de la bomba es de 10 Litros por segundo (medido a nivel de campo).

La concentración máxima de solución de riego (que sale por cada emisor) a la que se quiere trabajar es de 0,5 gramos por litro.



¿Qué tasa de inyección debo medir en el caudalímetro?
(aplicar ecuación 13)

$$\text{Tasa de inyección} = \frac{0,5 \text{ (g/L)} \times 6}{10 \text{ (L/s)} \times 0,2 \text{ (Kg/L)}} = 1,5 \text{ L/min}$$

6.3. Cálculo de ácido a aplicar para neutralización

Para neutralizar concentraciones excesivas de bicarbonatos en el agua de riego se realizan aplicaciones de ácidos (fosfórico, sulfúrico, nítrico, clorhídrico), cuyo cálculo de dosificación se presenta en la siguiente ecuación (100% concentración):

$$DA = \frac{[HCO_3] \times 0,7 \times \text{Vol. agua} \times PE \text{ Ac}}{\text{Densidad ácido} \times 1.000} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

DA : Dosis de ácido (L/ha)

$[HCO_3]$: Concentración de bicarbonatos (meq/L)

0,7 : Fracción porcentual de concentración de bicarbonatos a neutralizar (70%). Cuando se neutraliza más de un 75% u 80% del bicarbonato presente se produce una fuerte caída en el pH, pudiendo generar nuevos problemas.

Vol. Agua: Volumen de agua a aplicar (evento de riego, período fenológico, temporada de riego)

PE Ac : Peso equivalente del ácido a emplear, pudiendo ser

Ácido nítrico (HNO_3^-): 63 mg/meq

Ácido Sulfúrico ($H_2SO_4^{2-}$): 49 mg/meq

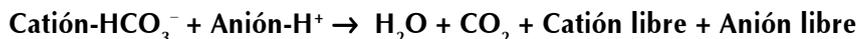
Ácido Fosfórico ($H_2PO_4^{3-}$): 32,3 mg/meq

Ácido Clorhídrico (HCL): 36,5 mg/meq

1.000 : Factor de corrección de unidades



La reacción química durante el proceso de acidificación en términos simples es la siguiente:



Donde:

Cación libre = Ca^{+2} o Mg^{+2} o Na^+ , derivado del bicarbonato neutralizado.

Anión libre = NO_3^- o SO_4^{2-} o PO_4^{3-} o Cl^- , derivado del ácido aplicado (nitrítico, sulfúrico, fosfórico, clorhídrico).

Cabe considerar que durante la neutralización de los bicarbonatos se solubilizan sales, generando un aumento en la CE.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de dosis de ácido a inyectar para neutralizar los bicarbonatos.

Ejemplo 11. **Cálculo de dosis de ácido a inyectar**

Cultivo	: viñedo variedad Carmenere
pH del agua	: 7,2
Bicarbonatos en el agua	: 1,25 meq/L
Agua aplicada	: 3.000 m ³ (para toda la temporada)
Ácido a utilizar	: ácido fosfórico
Densidad del ácido	: 1,7 Kg/L
Bicarbonato a neutralizar	: 70%



La dosis total de ácido fosfórico a emplear para toda la temporada de riego se determinará empleando la ecuación 14 propuesta anteriormente (se considera 100% de concentración en el Ácido).

$$\text{Dosis de ácido} = \frac{1,25 \times 0,7 \times 3.000 \times 32,3}{1,7 \times 1.000} = 50 \text{ L/ha}$$

La distribución de la dosis del ácido se realizará de forma proporcional a la distribución del volumen de agua a aplicar durante la temporada (método cualitativo o de trabajo por concentración).





ANEXOS

Anexo 1. Rango de Valores de Kc de cultivos

Cultivo	Valor mínimo	Valor máximo
Alfalfa	0,85	1,00
Almendro	0,95	1,05
Arándano	0,60	1,00
Avellano Europeo	0,70	0,80
Cerezo	1,00	1,25
Ciruelo	0,90	1,15
Damasco	0,80	1,15
Duraznero y Nectarino	1,00	1,15
Espárragos	1,00	1,10
Frambuesa	0,70	0,80
Granado	0,80	0,95
Kiwi	1,10	1,20
Limonero	0,60	0,80
Maíz	1,00	1,10
Manzano	1,05	1,25
Naranja	0,65	0,90
Nogal	0,90	1,10
Olivo	0,55	0,85
Palto	0,75	0,85
Papas	1,00	1,10
Peral	1,00	1,15
Pistacho	1,10	1,30
Pradera	0,90	1,05
Remolacha	1,00	1,10
Tomate	1,00	1,10
Vides Viníferas	0,50	0,60
Vid de mesa	0,80	1,30

Fuente: Comisión Nacional de Riego (CNR)



Anexo 2. Glosario de Términos

Anión: Es una molécula con cargas eléctricas negativas.

Catión: Es una molécula con cargas eléctricas positivas.

Conductividad eléctrica: Es la medida de la habilidad de una solución de conducir corriente eléctrica que varía tanto con el número como con el tipo de iones presentes.

Cota: Número que aparece en los mapas para identificar las alturas de los suelos con respecto al nivel del mar.

Estado de saturación del suelo: Se refiere a cuando el suelo se encuentra con todos sus espacios porosos ocupados solo por agua.

Estomas: Aberturas que se encuentran en las hojas las cuales permiten el intercambio de gases con el ambiente.

Estrata: Se refiere a las capas del suelo que forman la estructura.

Evapotranspiración: Es la suma de la evaporación del agua contenida en el suelo mas la transpiración del agua de las plantas.



Fenología: Es el estado de las plantas según las épocas del año (floración, dormancia, puntas verdes, etc.).

Fluvial: Referente a los escurrimientos de aguas superficiales.

Humedad aprovechable: Es el contenido de agua en el suelo que está a disposición de las raíces de las plantas, en un rango entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Infiltración: movimiento del agua a las capas más profundas del suelo.

Ión: es un átomo o un conjunto de átomos cargados eléctricamente, encontrándose dos tipos anión (negativo) y catión (positivo).

Napa freática: Acumulación de aguas subterráneas disponibles para su extracción.

Nivel dinámico: Se refiere al nivel mínimo de agua que alcanza la noria o pozo después de ser bombeado en forma continua.

Nivel estático: Es el nivel máximo de agua acumulada que alcanza la noria o pozo, antes de ser bombeado.



Nivel freático: Nivel de profundidad al que se encuentra el agua en el suelo para su extracción.

Nivel piezométrico: Es la altura a la cual se encuentra el agua.

Percolación: Es el escurrimiento natural del agua a través del suelo no saturado por efecto de la gravedad.

Perdida de carga: Perdidas de energías generadas por fricción en las tuberías, principalmente.

pH: Símbolo que se utiliza para identificar el grado de acidez o salinidad del suelo, agua, u otro compuesto.

Pluviometría: Cantidad de agua caída en un tiempo determinado y medido en milímetros.

PPM: Partes por millón, unidad empleada usualmente para valorar la presencia de elementos en pequeñas cantidades.

Potencial mátrico: Es la fuerza con que las partículas del suelo son capaces de retener el agua.

Textura del suelo: Se refiere a como se encuentran unidas las partículas del suelo.