

CONTENIDO

RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA <i>Luis Khan Prado – Alexander Gill</i> -----	1
MANEJO DEL AGUA EN FERTIGACION <i>Marcelo Calvache</i> -----	45
PRINCIPIOS BASICOS DE FERTIRRIGACION <i>Javier Castellanos</i> -----	65
SEGUIMIENTO DE LA NUTRICION DEL CULTIVO EN LOS SISTEMAS DE FERTIRRIGACION <i>Javier Castellanos</i> -----	76
MANEJO DEL RIEGO Y CALCULOS EN FERTIGACION <i>Marcelo Calvache</i> -----	81
REQUERIMIENTOS DE AGUA Y NUTRICION DE CULTIVOS DE FLORES <i>Edgar Amézquita</i> -----	91
APLICACION DE NUTRIENTES CON EL AGUA DE RIEGO <i>John Clapp</i> -----	107
FERTIGACION DE CULTIVOS BAJO INVERNADERO <i>Washington Padilla</i> -----	112
PROCESOS DE ACUMULACION DE SALES EN FERTIRRIGACION <i>Alvaro García</i> -----	126
MANEJO DE SUELOS CON ACUMULACION DE SALES <i>Alvaro García</i> -----	139
PREPARACION Y DESINFECCION DE SUELOS <i>Edgar Amézquita</i> -----	157
PREPARACION DE SOLUCIONES NUTRITIVAS PARA FERTILIZACION <i>Soraya Alvarado</i> -----	169
ACIDEZ Y ENCALADO DE LOS SUELOS <i>José Espinosa</i> -----	180

RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA

Luis Khan Prado y Alexander Gil

I. DISEÑO AGRONÓMICO

INTRODUCCION

El riego localizado de alta frecuencia, tanto el riego por goteo como la microaspersión, se define como aquellos sistemas donde el agua se aplica de forma dirigida y localizada hacia la zona de aprovechamiento radical de los cultivos. Se caracteriza, como lo indica su nombre, por la localización, lo cual implica un humedecimiento parcial del área total bajo riego, quedando, en el volumen total de suelo explorando por las raíces, solamente una porción de él humedecido como en el caso de la microaspersión, o pequeños volúmenes parciales, tal como ocurre en el riego por goteo. El resto del suelo no se humedece, por lo tanto, la planta modifica su patrón y activa en los volúmenes de suelo humedecido. Otro aspecto importante es la alta frecuencia de aplicación de agua, procedimiento prácticamente impuesto por el bajo volumen de suelo explorado por las raíces, a fin de compensar el consumo normal de agua por las plantas. En cuanto a la magnitud de las dosis de agua aplicadas, algunos opinan que estas deben reducirse como consecuencia de la localización, mientras otros acotan que, debido a la localización, quedarán áreas reducidas expuestas a la evaporación directa, pero, como consecuencia de la alta frecuencia, esta exposición se realiza más frecuentemente que en los riegos tradicionales; por lo que se puede considerar una evaporación equivalente (Figura 1).

De hecho, existen cultivos en hileras, viñedo y huertos frutícolas, etc., donde la reducción de la Ev en riego localizado parece despreciable. Datos lisimétricos obtenidos en Davis, California (Pruit, citado por Fereres), indican que las tasas de ET en tomate bajo riego por goteo y por surcos, fueron idénticas, cuando el porcentaje de suelo sombreado superó el 50%. Al parecer, en este caso, la mayor parte de la ET se debe a la transpiración, siendo la evaporación solo una pequeña fracción de la ET. También pudieran ser que la reducción en la evaporación se compense con el incremento de la transpiración debido a la microadvección local (Figura 2).

En cuanto a las características relacionadas con el régimen de movimiento de agua en el suelo, este método se diferencia notablemente de los sistemas de riego tradicionales, en los cuales el movimiento del agua en el suelo se realiza en una sola direc-

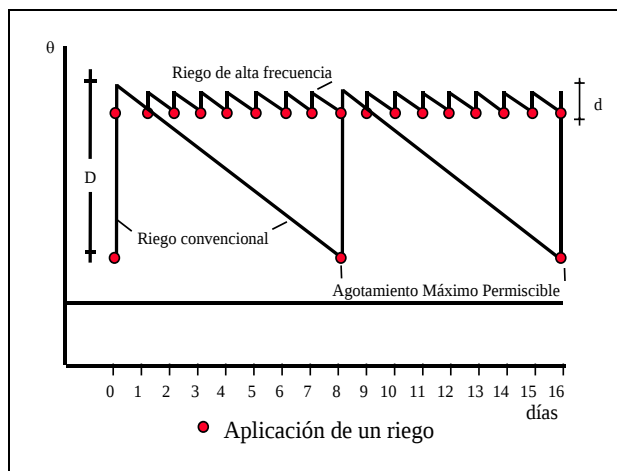


Figura 1. Cronograma de aplicación de riego de alta frecuencia, en comparación con el riego convencional.

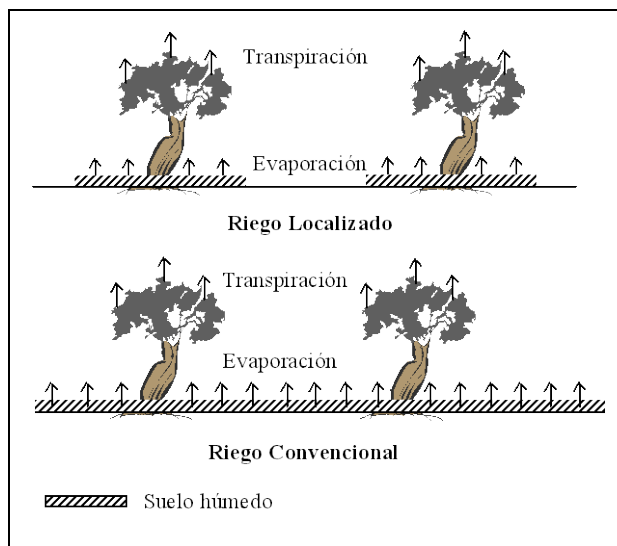


Figura 2. Efecto de la localización y aplicación completa sobre la evaporación y transpiración de los cultivos.

* Profesores, Universidad de Oriente, Maturín, Venezuela. Tomado de las Memorias del Seminario de Fertirrigación organizado por la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), con autorización de la SCCS.

ción, la vertical. Cuando la aplicación de agua es puntual, tal como ocurre en riego por goteo, toda la propagación de humedad ocurre a través del medio suelo y, desde ese punto de aplicación, el agua se difunde mediante un flujo tridimensional, formándose los llamados bulbos de humedecimiento, cuya forma y dimensiones van a depender de las propiedades físicas del suelo y de las características de la aplicación: textura, caudal y tiempo de riego. En las llamadas líneas de aplicación continua o cintas de exudación, en lugar de realizarse en un punto, la aplicación tiene forma de línea continua, en cuyo caso el régimen de flujo se realiza en dos dimensiones. En el caso de la microaspersión, la aplicación se realiza mediante un microaspersor que lanza el agua a la atmósfera alrededor de la planta y cae al suelo humedeciendo un área relativamente pequeña. A partir de esta área humedecida el agua se trasmite en el suelo mediante un flujo tridimensional (Figura 3).

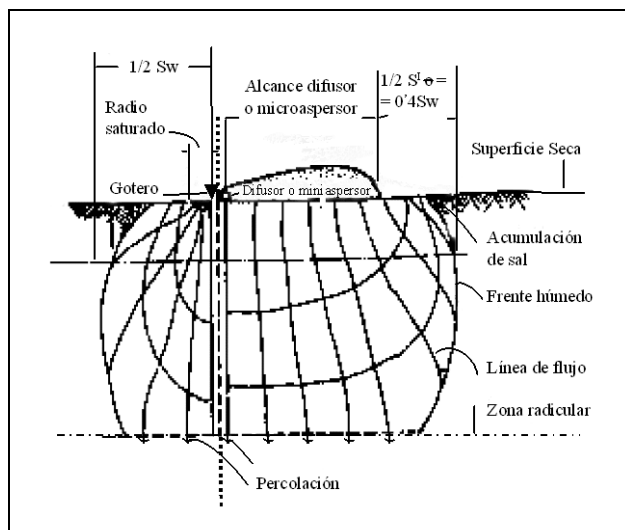


Figura 3. Bulbos húmedos formados en suelos arenoso y homogéneo por un gótero y un microaspersor.

CONSUMO DE AGUA POR LAS PLANTAS REGADAS BAJO RIEGO LOCALIZADO

El término evapotranspiración se ha venido definiendo como la suma del agua evaporada directamente desde el suelo, de la evaporación del agua libre interceptada y retenida por el follaje (rocío, lluvia, etc.) y del agua transpirada por el cultivo hacia la atmósfera. El objetivo primordial del riego es proveer a la planta del agua que requiere para cumplir con holgura con sus procesos evapotranspirativos.

Por otro lado, la fotosíntesis es el proceso fisiológico mediante el cual la planta crece y ocurre solamente bajo la presencia de luz solar, CO_2 y agua, y cuando los estomas de las hojas se encuentran abiertos. El agua transpirada proviene del suelo y para llegar a las hojas, lugar donde ocurre la transpiración, debe atravesar el continuo suelo-planta-atmósfera. Fereres describe el proceso desde un punto de vista estrictamente físico. La planta es un sistema de transporte hidráulico entre una fuente, el suelo, y la atmósfera que actúa como un sumidero. Este movimiento del agua desde el suelo hasta la atmósfera atravesando la planta, en contra de la gravedad y con la resistencia debida a las pérdidas de carga hidráulica que ocurren en el suelo y los tejidos, ocurre debido al cambio de fase del agua, líquida a vapor, que ocurre en las hojas, lo cual causa una gran caída del potencial hídrico, debido a la constante pérdida de agua que ocurre en los estomas. Ese descenso de potencial de agua a través de todo el continuo: suelo-raíz-xilema, xilema-hoja y, finalmente, hoja-atmósfera incrementa los déficit de agua aumentando las resistencias pero, paralelamente aumentan también los gradientes y los tejidos comienzan a perder agua, debido a la Ley de Darcy.

De las tres resistencias más importantes que ocurre en el continuo suelo-xilema-hoja-atmósfera, la resistencia hoja-atmósfera es la de mayor magnitud y la única que la planta puede manipular a corto plazo, mediante la regulación estomática. La resistencia del suelo es inversamente proporcional a la conductividad hidráulica, la cual, a su vez, depende del contenido de agua en el suelo. En general se puede decir que si las plantas están bien hidratadas, los estomas se abrirán durante el día. Si un déficit hídrico ocurre, los estomas se van cerrando parcialmente para así restringir la pérdida de agua y el ingreso de CO_2 atmosférico. Como se dijo, el proceso de pérdida de agua a través de la planta se llama transpiración. Existe una relación lineal entre la tasa de transpiración y la cantidad de materia seca acumulada durante el proceso, aunque hay diferencia de acuerdo al cultivo y a las condiciones ambientales. La relación entre la transpiración y la cantidad de materia seca producida o cualquier otro parámetro involucrado en la producción, se conoce con el nombre de "Relación Transpiración – Producción", la cual involucra la "Eficiencia de uso del agua". De lo anterior se puede deducir que para alcanzar con la garantía de una adecuada suplencia hídrica, capaz de mantener los procesos transpirativos a su máxima intensidad. Por supuesto, otros factores también intervienen en el proceso productivo tales como: fertiliza-

ción, control de plagas y enfermedades, etc., los cuales pueden también afectar indirectamente la transpiración.

Las respuestas de los cultivos a la irrigación no debería verse afectada por el método de riego que se emplee, sino por el régimen de humedad que dicho método de riego imponga al cultivo en cuestión, por lo tanto, la información existente en cuanto a riego se refiere es aplicable también a los nuevos métodos de riego localizado. Los aspectos fundamentales que lo hacen diferente son:

- Capacidad para mantener casi constante niveles muy elevados de humedad del suelo.
- Localización del agua en una fracción del volumen radical total.

Keller y Karmelli basan la frecuencia de riego y el caudal total del sistema en la transpiración máxima, la cual se estima para viñedos entre 3 y 5 mm/día, para cítricas entre 4 y 6 mm/día y para hortalizas entre 5 y 8 mm/día. Estos dos autores, en su texto clásico de 1974, apuntan que, en huertos frutícolas jóvenes, con amplio espaciamiento entre plantas la copa de los árboles intercepta solo una porción de la radiación total que ingresa. Donde la superficie no sombreada también es regada, parte del agua aplicada se pierde a través del uso consuntivo de plantas indeseables y evaporación directa de zonas no beneficiosas. Estiman que en riego por goteo esas pérdidas se reducen a un mínimo y la transpiración de cultivo constituye prácticamente todo el uso consuntivo. La tasa de transpiración podría ser estimada por la siguiente ecuación:

$$T = ET \frac{Ps}{85} \quad (1)$$

Donde:

- T: Tasa de transpiración promedio bajo riego por goteo.
 Ps: Porcentaje de área sombreada por el cultivo.
 ET: Evapotranspiración máxima del cultivo calculada para los métodos de riego tradicionales (mm/día).

Ellos basan esta ecuación en un análisis lógico y observaciones de campo y "Nosotros sentimos que arroja resultados razonables", sin embargo, esta ecuación debe usarse con precaución hasta que investigaciones de campo permitan obtener resultados más confiables.

En 1980 Keller, para el SCS National Engineering Handbook, en la sección correspondiente a Trickle Irrigation, muestra como estimar el uso consuntivo para riego por goteo; dicha estimación se basa en que la transpiración constituye prácticamente toda el agua consumida por el cultivo y toma como base la evapotranspiración promedio diaria para el mes de máximo consumo, calculada por el método tradicional que se juzgue más conveniente, da una ecuación relativamente simple, específica para riego localizado.

$$Td = ET \left[\frac{Ps}{100} + 0.15 \left(1.9 - \frac{Ps}{100} \right) \right] \quad (2)$$

Donde:

- Td: Transpiración promedio diaria durante el mes de máximo consumo para cultivo bajo riego por goteo (mm/día).
 ET: Evapotranspiración potencial promedio diaria, para el mes de máximo consumo, calculada por los métodos tradicionales (mm/día).
 Ps: Es el porcentaje de área sombreada por la copa del cultivo a medio día

La validez de esta ecuación (2), apunta Keller, no ha sido verificada mediante investigación de campo; sin embargo, ella es basada en un análisis lógico acompañado de pruebas y observaciones de campo.

La transpiración estacional (Ts), la calcula sustituyendo ET por U, que es la evapotranspiración potencial estacional.

$$Td = U \left[\frac{Ps}{100} + 0.15 \left(1.0 - \frac{Ps}{100} \right) \right] \quad (3)$$

El segundo término de esta ecuación de Keller, corresponde al efecto de microadvección y emisión de radiación de onda larga desde las áreas secas hacia las húmedas. Para un 100% de área sombreada, Td = ET.

Un método sencillo para estimar la transpiración potencial (TP) fue propuesto por Goldberg, Gormat y Rimón (1976), el cual se basa en la evaporación a tina tipo A.

$$TP = 0.6 ET_{\text{cultivo}} \text{ o también} \quad (4)$$

$$TP = 0.7 Ev_{\text{(tina)}} \quad (5)$$

TP: Transpiración Potencial

Para efectos de reducción de la TP de acuerdo a la etapa de crecimiento del cultivo, para cultivos anuales dividen el ciclo del cultivo en cuatro cuartos iguales y utilizan como coeficientes, 0.25 para el primer cuarto, 0.50 para el segundo, 0.75 para el tercero y 1.0 para el cuarto. En cultivos perennes utilizan 0.25 el primer año, 0.50 el segundo, 0.75 el tercero y 1.0 a partir del tercero en adelante. Una apreciación más real parece ser la de Alkiburi, Marsh y Huntamer (1974) y citados por Rodrigo et al.

$$Td = 0.6 F \times Ev \text{ (tina)} \quad (6)$$

Donde:

F: Coeficiente de cobertura, el cual vale 1.0 cuando la cobertura es 75%, 1.33 para cobertura de 100%, 0.33 para el 25% y 0.13 para el 10%.

Td: Evapotranspiración con fines de diseño para riego localizado.

Como se puede notar, mediante la metodología propuesta es posible obtener valores de Td mayores que la ET del cultivo, lo cual pareciera razonable debido a que, con estos valores de consumo, el cultivo pudiera desarrollar su máxima capacidad productiva sin restricciones hídrica. En cultivos anuales o estacionales, para efectos de diseño, se debe considerar la Td máxima, tomada para el período de riego del cultivo; para cultivos perennes, tomará el máximo valor absoluto del año.

REQUERIMIENTO DE RIEGO

Para determinar los requerimientos de riego en un sistema de riego localizado, lo más importante es establecer la tasa de consumo neta que mejor se adapte a las condiciones de localización. Las altas frecuencias de aplicación reducen las dosis netas de tal forma que la capacidad de retención de agua por el suelo quedará relegada a un segundo plano. Las frecuencias de aplicación variarán desde un máximo de dos veces al día hasta un mínimo de una cada dos días. El tiempo de riego y la frecuencia o intervalo de riego están tan íntimamente relacionados que, al aumentar o disminuir el intervalo, en la misma proporción habrá que incrementar el tiempo de riego. Estos dos parámetros, por lo tanto, no son rígidos y pueden variarse durante el ciclo del cultivo, en el caso de cultivos estacionales o, durante la época del año, para el caso de cultivos perennes, de acuerdo al criterio y a la experiencia del operador. Sin embargo, con fines de diseño algunos parámetros deberán quedar establecidos.

En el caso de la determinación de las demandas de riego, la experiencia local es preferible a cualquier metodología importante, por ejemplo, en el Edo. Monagas, en Venezuela, se sabe que la evapotranspiración máxima para Maturín es del orden de 7.2 mm/día, el mismo valor puede ser usado para Jusepín, El Tejero y Santa Bárbara. Para la Mesa de Guanipa en Anzoátegui se estima en 6.2 a 6.8 mm/día. Para Caripe se puede hablar de 5.5 mm/día; mientras en Flacón se habla de 8.5 mm/día. Por supuesto, si no se cuenta con valores ya calculados y existen registros climáticos, los cálculos de la Td son sumamente sencillos, sobre todo si se cuenta con registros de evaporación a la tina tipo A.

En Venezuela no se acostumbra deducir la precipitación efectiva del consumo neto diario para la determinación de las demandas de riego, debido que, bajo un régimen tropical, durante los meses de riego (Octubre – Mayo), pero sobre todo en los meses de Enero a Abril, las lluvias son tan escasas y erráticas que no vale la pena tomarlas en cuenta para la determinación de las demandas diarias de riego, como base para el diseño hidráulico, pero si serán tomadas en cuenta en la operación, solo con decisiones sobre la marcha.

Lámina Neta de Riego

La lámina neta que debe aplicarse al suelo en cada riego para satisfacer el uso consuntivo viene dada por la fórmula:

$$dn = Td \times Fi \quad (7)$$

Donde:

dn: Es la lámina neta de riego (mm)

Fi: Intervalo de frecuencia de riego (día)

Con fines de diseño se tomará Td, como la que resulte de la máxima área sombreada (Ps) esperada. Correspondiente al cultivo adulto en pleno estado de madurez, para efectos del dimensionamiento hidráulico de la red de distribución.

Además debe establecerse algún medio de comparación que permita asegurar que el suelo será capaz de retener en su seno hasta la profundidad radical, la lámina neta que se le está aplicando, sobre todo en suelos de textura gruesa.

$$dx \leq dn \quad (8)$$

en el cual:

$$dx = \frac{\% \text{ Agot.}}{100} \times \frac{Pw}{100} \cdot du \cdot Z \quad (9)$$

Donde:

- dx: Lámina neta requerida para llevar el suelo a su capacidad de campo, luego de un agotamiento permitido (mm).
 %Agot: Porcentaje de agotamiento permisible, del agua útil almacenable.
 du: Lámina útil total almacenable por unidad de profundidad de suelo (mm).
 Z: Profundidad radical (m).
 Pw: Porcentaje de suelo humedecido.

Este valor de dx solo servirá como medio para comparar con la dn de diseño, para verificar que el suelo será capaz de almacenarla.

Lámina brutal de riego (db)

La lámina que debe aplicarse al suelo, para que sea capaz de suplir la lámina neta de riego dn, compensar la desuniformidad del sistema, las pérdidas inevitables por percolación profunda y los requerimientos adicionales para la lixiviación de sales. Las pérdidas inevitables por percolación profunda, pueden servir también para el lavado de sales. Aquí pueden presentarse dos situaciones:

- 1.- Cuando las pérdidas por percolación profunda sean mayores que los requerimientos de lixiviación, esto es:

$TR > 1/(1-LRt)$; o $LRt < 0.1$, entonces:

$$db = \frac{dn \cdot TR \cdot 100}{CU} \quad (10)$$

- 2.- Cuando las pérdidas por percolación profunda sean insuficientes para suplir los requerimientos de lixiviación, esto es:

$Tr < 1/(1.0 - LRt)$; o $LRt > 0.1$, entonces:

$$db = \frac{dn}{CU (1.0 - LRt)} \quad (11)$$

Donde:

- db: Lámina bruta de riego (mm).
 Tr: Relación de transpiración en el período de uso consuntivo máximo.
 CU: Es la uniformidad de emisión (%).

LRt: Es la fracción de agua requerida para la lixiviación de sales, bajo riego por goteo.

Eficiencia de aplicación

Los cálculos de los requerimientos de riego, la eficiencia de aplicación no puede dejarse a un lado en riego localizado, aun y cuando, dadas las características de funcionamiento, las pérdidas se reducen a un mínimo. Es por lo tanto un sistema de alta eficiencia que, en teoría, debería ser de 100%, sin embargo en la práctica esto no se consigue nunca.

Una serie de factores interactúan para definir la eficiencia de aplicación. Unos son totalmente independientes de la mano del hombre, tales como la evapotranspiración, mientras que otros están bajo el control del diseñador como el coeficiente de Uniformidad de agua, el cual es función de la distribución de presiones a lo largo de la red de distribución. Las normas de diseño hidráulico toman en cuenta el coeficiente de Uniformidad de agua, el cual deberá ser suficientemente alto, a fin de sacar el máximo provecho a un sistema de riego tan costoso.

El concepto de Eficiencia de Aplicación toma en consideración las pérdidas de agua que normalmente ocurren en todo sistema de riego. Es decir, no toda el agua aplicada es aprovechada por el cultivo, parte se pierde en la conducción, otra ya en el terreno por evaporación, escorrentía superficial y percolación profunda. Además, hay un volumen importante que no se aprovecha, el cual deberá aplicarse para compensar la desuniformidad en la aplicación de agua.

La eficiencia se define como la relación entre la porción de agua que es utilizada por el cultivo y el agua total aplicada. En riego por goteo la mayoría de las pérdidas se reducen notablemente por lo que la eficiencia pasa a depender solamente de la uniformidad de aplicación y de la relación de transpiración, término inicialmente introducido por Keller.

$$Ef = CU/TR \quad (12)$$

Donde:

- Ef: Eficiencia de Aplicación (%)
 TR: Relación de Transportación.
 CU: Coeficiente de Uniformidad (%)

Relación de transpiración, TR, la cual es la relación entre la lámina total aplicada sobre el área donde la transpiración es satisfecha y la lámina transpirada. Representa la fracción de agua que debe ser aplicada sobre la zona donde la transpiración es satisfecha para compensar la porción que se pierde por percolación profunda, las cuales resultan inevitables aun durante los períodos de máximo consumo. Con fines de diseño se pueden tomar los siguientes valores de TR.

- TR = 1 en cultivos con raíces profundas (más de 1.5 m), en todos los suelos excepto suelos de textura gruesa y gravosos; profundidad radical media (0.75 a 1.5 m) en suelos de textura media; raíces superficiales. (< 0.75 m) en suelos de textura fina.
- TR = 1.05 para cultivos de raíces profundas en suelos de textura gruesa y gravosos; profundidad radical media en suelos arenosos; raíces superficiales en suelos de textura media.
- TR = 1.10 para profundidad radical media en suelos gravosos; en raíces superficiales en suelos arenosos. Para microaspersores se debe añadir 0.05 a la RT dadas para goteo.

Uniformidad de emisión (UE), Inicialmente se utilizaba para riego por localizado la fórmula de CU propuesta por Christiansen para riego por aspersión, la cual mide las desviaciones con respecto a la media, dándole igual peso a los valores por encima que a los por debajo de la media.

En goteo, los valores que están por debajo de la media significan un menor volumen de agua que recibirán las plantas que se encuentren en esa situación, por lo tanto disminuirán su producción notablemente. Con aspersión este problema se compensa con las bajas eficiencias de aplicación (70-75%). El riego por goteo exige CU mayores a 90%.

En base a estos planteamientos, Keller y Karmeli propusieron la siguiente fórmula, aceptada para riego por goteo.

$$CU = 100 \left(1 - 1.27 \frac{V}{\sqrt{e}} \right) \frac{q_{\min}}{q_m} \quad (13)$$

Donde:

- CU: Coeficiente de Uniformidad para diseño (%).
- Vs: Coeficiente de variación por fabricación del sistema.

- V: Coeficiente de variación por fabricación del goteo.
- e: Número de goteros por planta o área de la planta/área del goteo.
- $q_{\min}$: Descarga mínima de los goteros computada a la presión mínima de operación, en base a la ecuación $q = k H^x$. (l/hr)
- q_m : Caudal medio de todos los goteros considerados (l/hr).

o, también

$$CU = (100 - 1.27VS) \frac{q_{\min}}{q_m} \quad (14)$$

Requerimientos de lixiviación

Es el otro componente de la lámina brutal, se refiere a la lámina de agua adicional que se debe aplicar al suelo con cada riego, a fin de mantener el balance de sales en los límites deseables. En riego localizado la acumulación de sales ocurre en la parte superior del bulbo humedecido, dejando la zona central con muy bajas concentraciones, esto, claro está, mientras se mantenga la humedad en el bulbo en los niveles que normalmente se manejan para riego de alta frecuencia. En climas tropicales, en suelos con buen drenaje interno, las lluvias torrenciales que ocurren durante la estación húmeda, se encargan de lixiviar estas sales acumuladas durante la época seca. En Venezuela, en todos los llanos orientales del país, los suelos son bien aireados y bien drenados, por lo que la lixiviación de sales no representa ningún problema. Hacia el Occidente del país, los suelos son más pesados, con drenaje interno menos libre y, en algunos casos, con niveles freáticos altos. Ejemplos de estas situaciones se encuentran en los llanos occidentales de Guarico, Barinas y Portuguesa; así mismo, al sur del Lago de Maracaibo. Bajo estas condiciones será necesario establecer los requerimientos de lixiviación a fin de que sean incluidos en el diseño hidráulico.

En un trabajo realizado por D. G Watts (1971), para el Departamento de Irrigación e Ingeniería Agrícola de Utah State University, (USA), se realizó un estudio de Recuperación de los suelos de Textura Ligera y mediana del Proyecto Atlántico-3 en Colombia. Este proyecto tiene capacidad para producir una gran cantidad de cultivos de alto valor tanto para exportación como para consumo interno. Sin embargo, presentan problemas graves de salinidad. En el trabajo se realiza un intento para establecer métodos para lavar los suelos, haciendo

pasar a su través láminas de 500 mm de agua, mediante inundación. En general el proyecto consta de unas 32.000 has, ubicadas sobre las llanuras relativamente planas de la Costa Norte de Colombia. Una bien dirigida agricultura bajo riego juega parte importante en el concepto de desarrollo.

Los suelos aluviales de textura ligera a mediana encontrados cerca del río Magdalena y del canal de El Dique, tienen un considerable potencial agrícola para el desarrollo de cultivos de alto valor como cítricos. Desafortunadamente, esos suelos no son uniformemente buenos, debido a que algunas áreas son afectadas por problemas de salinidad. Por ejemplo, medidas realizadas en la granja experimental Santa Lucía, indican que una parte importante de sus suelos se encuentran afectados por problemas de relativa magnitud debidos a sales.

No cabe duda que en situaciones como estas, los sistemas de riego localizados tienen ventajas de manejo, debido al lavado intrínseco de sales que ocurre en los bulbos de humedecimiento, donde las sales son llevadas, mediante el flujo masal, desde el epicentro del bulbo hacia su periferia, disminuyendo su concentración y permitiendo el desarrollo radical en la zona donde es más intensa su actividad. Sin embargo, el manejo integral del problema habría que comentarlo con mayor información, sobre todo en lo que a lluvia se refiere, a objeto de atacar el problema concatenando la información disponibles de parámetros que inciden sobre el lance de sales: Precipitación, mesa de agua, calidad de las aguas de riego, tolerancia del cultivo, drenaje, etc. por supuesto que bajo estas circunstancias, el requerimiento de agua para la lixiviación de sales, debe ser considerado en el diseño agronómico de riego.

En síntesis, el establecimiento de los requerimientos de riego es el paso crucial en el diseño de riego localizado, en un primer momento es preferible errar por exceso que por defecto. Los errores por exceso son fácilmente corregibles y, además, se cuenta con la seguridad de que el sistema diseñado funcionará siempre holgadamente. Por supuesto, los excesos siempre habrán que pagarlos con dinero.

El método de riego por goteo no permite una verdadera lixiviación de sales hacia estratos profundos, normalmente las sales se acumulan en la periferia del bulbo humedecido. Una sobre aplicación de agua, sin embargo, permite incrementar el tamaño del bulbo, alejando las sales de las raíces.

En zonas áridas o semiáridas y en el caso de cultivos estacionales debe trazarse las hileras siempre por el mismo sitio, dejando marcas en el terreno, de una estación a la siguiente. Una solución efectiva, pero costosa en combinar el sistema de riego por goteo con un sistema de riego por aspersión para el lavado de sales.

Los requerimientos de lavado se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$LRt = \frac{CE_{ar}}{2 CE_e} \quad (15)$$

Donde:

LRt: Requerimiento de lavado en décimas.

CE_{ar}: Conductividad Eléctrica del agua de riego (mmho/cm)

CE_e: Mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo.

Volumen bruto requerido por día y por planta

$$G = \frac{Sp \ Sh \ db}{Fi} \quad (16)$$

Donde:

Sp: Espaciamiento entre plantas.

Sh: Espaciamiento entre hileras.

G: Es el volumen bruto requerido por día y por planta. (l/día).

Lámina neta por temporada de riego

Este valor no es más que la lámina de agua que resulta al sustraer a la transpiración de la estación, Ts, la correspondiente precipitación efectiva y al lámina de agua remanente almacenada en el suelo de la estación anterior.

$$In = (U - Pe - Ws) \left[\frac{Ps}{100} + 0.15 \left(1.0 - \frac{Ps}{100} \right) \right] \quad (17)$$

Donde:

In: Lámina de la estación o temporada de riego (mm).

Pe: Precipitación efectiva durante la estación (mm)

Ws: Lámina de agua remanente que permanece almacenada en el suelo de la estación anterior (o del período de lluvia) (mm).

Este valor de I_n puede utilizarse para los cálculos de requerimiento totales de agua y para la determinación de los costos totales del bombeo, pero no para el diseño hidráulico.

AREA HUMEDECIDA

Los intentos para obtener relaciones matemáticas para predecir las dimensiones de los bulbos de humedecimiento, han sido fallidos, debido a la enorme variación de las propiedades del suelo. Las pruebas realizadas localmente son la mejor forma para determinar las dimensiones del bulbo y sus variaciones con las características de la aplicación. Para un perfil dado, la distancia del frente de humedecimiento al punto de aplicación, puede ser aproximado mediante una ecuación empírica de forma exponencial:

$$X = a(Ta)^n \quad (18a)$$

$$Y = b(Ta)^m \quad (18b)$$

En la cual:

X, Y: Distancia horizontal y vertical respectivamente, del punto de aplicación de humedecimiento (cm).

Ta: Duración de la aplicación (hr).

a, b, n, m: son parámetros empíricos que dependen de las características del suelo y de la aplicación de agua.

Para suelos homogéneos de textura media y los frentes verticales y horizontales se mueven aproximadamente a la misma tasa. En suelos finos existe un predominio del frente horizontal, mientras que en los de textura gruesa en el frente vertical en que predomina.

La Figura 4 muestra la forma y desplazamiento del frente de humedecimiento mediante la aplicación de un volumen constante de agua de 45 litros, sobre un suelo arenoso, fino, seco y de perfil homogéneo, mediante 3 caudales de aplicación diferentes, 4, 8 y 12 l/hr. Es interesante notar que los patrones de humedecimiento vertical y horizontal son casi idénticos para los tres caudales utilizados pero con el mismo volumen total. El hecho de que el caudal de 4l/hr produzca una área humedecida mayor que los caudales mayores se debe a que este suelo, aún con periodos largos de tiempo,

no tienen restricciones en la infiltración, situación poco común. Lo usual es que los caudales más altos produzcan sobresaturación (encharcamiento) en la superficie del suelo, generando patrones humedecidos más anchos.

En el caso de los emisores donde el agua se propaga a través del aire, el problema se resuelva midiendo la superficie humedecida o directamente tomando el diámetro humedecido de los catálogos del microaspersor. Aunque posteriormente habrá en el suelo un movimiento horizontal adicional poco importante, el cual, en el diseño solo interfiere como margen de seguridad.

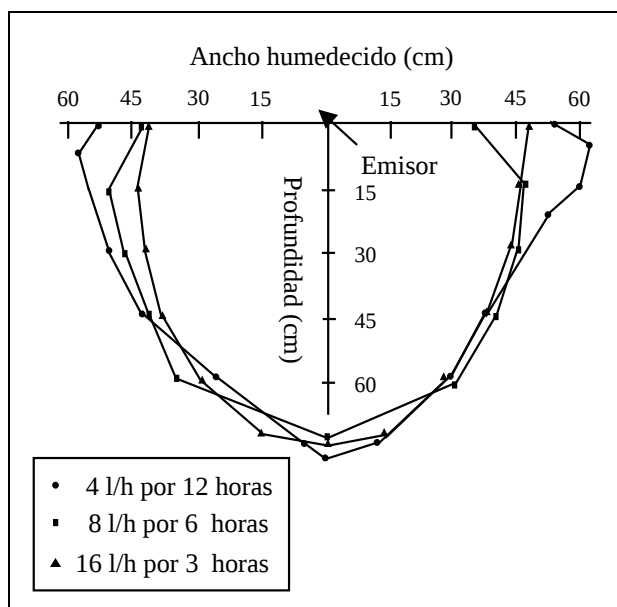


Figura 4. Perfiles humedecidos por el mismo volumen de agua aplicado con tres caudales diferentes a un suelo arenoso seco.

Significado del porcentaje de área humedecida

Existe cierta controversia en cuanto a la proporción de área que debe ser humedecida por el riego, sobre todo en cuanto al patrón de referencia que debe tomarse; en base al área sombreada o al área total. Ambos criterios son igualmente aplicables. Sin embargo, el área sombreada es variable en cuanto al estadio de crecimiento del cultivo y alcanza su valor máximo cuando el cultivo es adulto y se encuentra en su plena madurez.

En el oriente venezolano se tiene buena experiencia con un porcentaje de humedecimiento entre 25 y 35%, para cultivos ampliamente espaciados, tomando en base al área total.

El porcentaje de suelo humedecido fue establecido por Keller y Karmeli como el promedio de la relación porcentual entre el área humedecida, tomada a una profundidad de 15 a 30 cm, con respecto al área total. Realmente no se cuenta con una recta exacta para el establecimiento del porcentaje de humedecimiento; sin embargo, algunas consideraciones al respecto pueden hacerse.

La literatura muestra experiencias de producciones elevadas con valores de porcentaje de suelo humedecido (P_w) de 20%, indicando un buen comportamiento del cultivo, siempre y cuando el agua suministrada compense la ET. Se presentan además situaciones en que la baja productividad de los cultivos se le atribuye al bajo valor de humedecimiento. Lo que es muy cierto es lo siguiente: mientras menor es el valor de P_w , el volumen de suelo humedecido es tan escaso que la cantidad de agua que queda en el suelo almacenada después de un riego es relativamente pequeña; por lo cual, en el caso de fallas del sistema, esa cantidad de agua se agotará rápidamente, reduciendo la planta su tasa transpirativa y su crecimiento fisiológico. Altos valores de P_w proveen seguridad contra paradas repentinas pero, valores de P_w más altos, representan una mayor inversión inicial.

Aún suponiendo que la disminución de transpiración obtenida se tradujese en disminución de actividades fotosintéticas, las diferencias parecen tan pequeñas frente a las reducciones en el volumen de raíces mojado, que se podrían concluir que, con alta disponibilidad de agua mediante riego diario, se puede dejar de mojar el 100% del volumen radical, sin producir un “stress” hídrico importante.

En los riegos localizados no se moja toda la superficie del suelo, lo que para una profundidad de raíces dada, equivale a decir que no se moja todo el volumen de suelo correspondiente al perfil radical. Pero, siendo las raíces la principal vía de entrada de agua a la planta, el dato que interesa, a efectos de nutrición hídrica, es el volumen de raíces mojado, que normalmente no coincidirá con el volumen de suelo mojado, ya que ni el suelo es explotado uniformemente por las raíces, ni son todas ellas igualmente activas respecto a la absorción de agua.

Teniendo en cuenta el incremento de densidad radical que se produce en las zonas húmedas donde ésta aumenta tres o más veces con respecto al valor normal bajo sistemas de riego convencionales, pareciera que, en una primera aproximación, valores de porcentaje de suelo mojado respecto al área sombreada (P_w) del orden del 30% equivaldrían a

mojar a un volumen de raíces equivalente a la totalidad del volumen radical del cultivo. Sin embargo, al proliferar en las zonas húmedas raíces finas y activas, la superficie de raíces mojadas es muy alta y la resistencia radial a la absorción de agua será baja, con lo que el efecto final puede ser aún más importante que el que indica la simple comparación numérica.

La tabla 1 muestra las dos dimensiones de un rectángulo teórico humedecido, en el cual la dimensión más larga (S_w), corresponde al diámetro teórico humedecido por el emisor y la más corta (S_e) al 80% de ese diámetro. El diámetro fue tomado a una profundidad de 15 a 30 cm, donde el área humedecida será más del doble de la que se observa en la superficie a menos que el caudal del gotero se atan alto que cause escurrimiento superficial. Los valores indicados corresponden a un caudal del gotero de 4 l/hr, que es el valor de diseño más común; con riegos diarios o interdiarios donde se apliquen volúmenes suficientes para suplir el uso consuntivo. En el caso de utilizar laterales con emisores equiespaciados, se utilizará la dimensión más corta como espaciamiento. Multiplicado los dos valores entre sí resultará el área humedecida aproximada ($\phi \times 0.80\phi \approx \pi\phi^2 / 4$)

Casi todos los suelos son estratificados o dispuestos en capas; sin embargo, asumir que el área humedecida será más grande por esta razón, resultará riesgoso. Cuando la estratificación horizontal y la distribución en capas o la compactación son extremas, el área humedecida puede resultar el doble que la encontrada en la tabla., pero la única forma de obtener esos valores será con una prueba de campo. Los valores que resultan de la tabla 1 son solo estimaciones, pero permiten obtener ideas solo para intentos iniciales de diseño.

A manera de ejemplo se da la tabla 2, con algunos rangos de valores de caudal y volumen a utilizar en la prueba de campo. Con el equipo se aplican unos 3 o 4 volúmenes de agua con uno o dos caudales diferentes, varias veces con los mismos intervalos a que, en principio, se estima que se aplicarán los riegos. Al final de este proceso, bien por muestreo o abriendo con barreno una zanja. Según una línea recta que pase por el punto donde estaba situado el emisor se toman las medidas necesarias para dibujar con exactitud la forma del suelo humedecido. La prueba debe repetirse tantas veces como se estime conveniente de acuerdo a la variabilidad del suelo.

En cuanto a los terrenos inclinados, esta situación ocasiona una distorsión de los patrones de humedecimiento en el sentido de la pendiente, por lo tanto, aunque el área humedecida será equivalente a la de terreno plano, la ubicación del gotero debe hacerse pensando en esta distorsión.

Tabla 1. Área humedecida estimada para diferentes texturas de suelo, profundidad radical o de suelo y grado de estratificación, para un gotero de 4 l/hr, operando bajo condiciones normales de campo (Keller, 1980).

Profundidad Radical y Textura del suelo ⁽¹⁾	Grado de Estratificación del suelo ⁽²⁾ Área Humedecida Equivalente (m x m) ⁽³⁾		
	Homogéneo	Estratificado	En Capas
Profundidad 25 cm			
Gruesa	0.40 x 0.50	0.60 x 0.75	0.85 x 1.10
Media	0.70 x 0.90	1.0 x 1.20	1.25 x 1.50
Fina	0.90 x 1.10	1.20 x 1.50	1.50 x 1.90
Profundidad 150 cm			
Gruesa	0.60 x 0.75	1.10 x 1.40	1.45 x 1.80
Media	1.0 x 1.25	1.70 x 2.10	2.20 x 2.75
Fina	1.25 x 1.50	1.60 x 2.0	2.0 x 2.50
⁽¹⁾ Gruesa incluye áreas gruesas a medias. Medios incluye francos o franco arenoso; Fino incluye franco – arcillo – arenoso a arcilloso (en caso de suelos arcillosos agrietados, trátelos como gruesos).			
⁽²⁾ Estratificado. Se refiere a suelos de textura relativamente uniforme, pero presentando horizontes con diferente orientación de partículas o compactación, lo cual le da una permeabilidad horizontal mayor que la vertical. En capas se refiere a cambios textuales combinados con diferente orientación de partículas y compactación.			
⁽³⁾ Dimensiones del área rectangular humedecida equivalente, S'e y Sw; 0.8 Se por el diámetro humedecido, respectivamente.			

Tabla 2. Ejemplo de rango de caudal y volumen recomendado en las pruebas de campo para determinar las dimensiones del bulbo de humedecimiento.

Profundidad Radical (cm)	Tipo de Suelo	
	Franco (No Arenosos)	Arcilloso (Pesados)
0-30	4 a 8 l/h	2 a 4 l/h
	2 a 6 l	4 a 16 l
30-60	6 a 10 l/h	4 l/h
	4 a 12 l	8 a 20 l
60-90	8 a 12 l/h	6 l/h
	8 a 16 l	12 a 24 l
(Pérez Rodríguez, 1982)		

En general, Aw se incrementa con el tiempo de riego, con el número de goteros por planta y con el caudal del gotero, qe. Por lo tanto cuando se disminuye el intervalo de riego, generalmente se incrementa el área humedecida. Así, mismo, en suelos con bajas tasas de infiltración, donde se forman charcos superficiales o la presencia de horizontes barrera por permeabilidad en el perfil, cuando se incrementa qe, se incrementa también Aw. Eso no se cumple para suelos arenosos y homogéneos.

La tendencia actual de la fabricación de goteros está dirigida hacia los goteros embutidos o soldados en las paredes internas del tubo, los cuales vienen espaciados a 15, 30, 40, 50, 60, 75, 100 y 125 cm; con caudales de 2, 4 y hasta 8 l/hr. Los hay para una sola temporada de uso, muy económicos debido a que tienen paredes muy finas, también para múltiples temporadas, con paredes más gruesas que soportan el manipuleo al quitarles y colocarlos nuevamente la temporada siguiente. Los hay con caudal compensado y sin compensación. También, una línea completa para cultivos de siembra densa y raíces poco profundas. En esta línea hay toda una gama de caudal que van desde 1 l/hr hasta 3 l/hr.

Entre los microaspersores hay dos tipos: los estáticos, llamados también microjets y los dinámicos. Debido al retorcimiento de las tuberías laterales por efecto de los cambios de temperatura, es aconsejable no instalar los microaspersores directamente sobre las tuberías, sino sobre pedestales, lo cual le da además un mayor diámetro de tiro y una forma más uniforme de los patrones de riego.

Los microaspersores se utilizan principalmente para cultivos de porte arbóreo, sobre todo en suelos de texturas gruesas, donde el número de goteros por planta resultaría muy alto. Existen en el mercado toda una amplia gama de caudales que van desde 30 l/hr hasta 150 l/hr, con presiones de entrada entre 1.5 y 3 bar. Los diámetros humedecidos van desde 1.5 hasta 8 m.

DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE SUELO HUMEDECIDO

Se define como el área promedio humedecida sobre un plano horizontal ubicado entre 15 y 30 cm de profundidad, tomada como un porcentaje con respecto al área total. A continuación se definen algunos términos, los cuales también aparecen

dispuestos en la figura, con el fin describir la forma de disposición de los emisores y la superficie humedecida. La figura 5 muestra la disposición de los emisores en el campo, en cultivos ampliamente espaciados, mostrando además el área humedecida y el área sombreada.

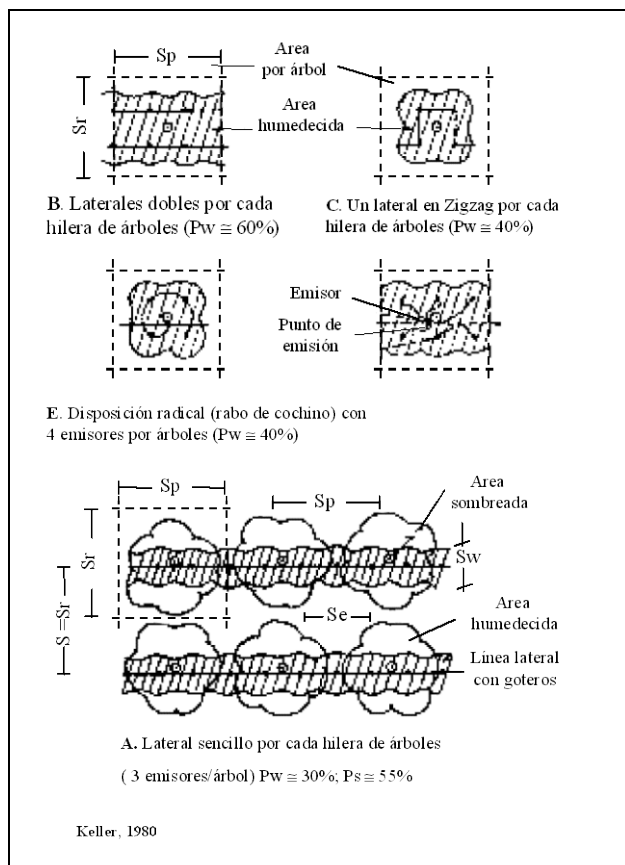


Figura 5. Disposiciones de laterales y emisores para cultivos permanente con amplio espaciamiento

Espaciamiento entre emisores (Se): Es el espaciamiento entre puntos de emisión sobre la línea lateral.

Espaciamiento óptimo entre puntos de emisión, S'e, representa el espaciamiento entre emisores, el cual es igual al 80% del diámetro humedecido, mediante una prueba de campo o en la tabla 1.

Ancho humedecido, Sw, es el ancho de la franja humedecida por emisores espaciados a una distancia Se sobre una línea lateral. Es igual al diámetro del área circular humedecida por un emisor. Puede ser medido directamente en el campo e estimado de la tabla 1.

Espaciamiento entre laterales, Sl, es el espaciamiento entre laterales de goteros.

El espaciamiento entre plantas es Sp y el espaciamiento entre hileras es Sr. El número de goteros por planta es e.

1.- Lateral sencillo: Para lateral sencillo recto, con $Se \leq S'e$, el porcentaje de suelo humedecido se determina como:

$$P_w = \frac{e Se Sw}{Sp Sr} 100 \quad (19)$$

Cuando $Se > S'e$, entonces Se debe ser reemplazado por S'e.

2.- Laterales dobles: La separación entre laterales dobles debe ser igual a S'e, a fin de maximizar el área humedecida sin dejar espacios intermedios sin humedecer. El valor estimado de PW es:

$$P_w = \frac{e S'e (S'e + sW)/2}{Sp Sr} \quad (20)$$

3.- Disposición radial (rabo de cochino): goteros de múltiples salidas y laterales simples dispuestos en zigzag, la formula que se utiliza en la misma anterior, pero, al momento de disponer los emisores en el terreno, debe tomarse en cuenta el valor de S'e, a fin de lograr áreas sólidamente humedecidas alrededor de la planta.

4.- Microaspersores: Tal como se puede observar en la figura 3, el área total humedecida por un microaspersor en el plano horizontal ubicado entre 15 y 30 cm de profundidad, es necesario añadir, al área humedecida en la superficie, el área correspondiente al agrandamiento periférico, la cual tendrá un ancho igual a S'e/2 y una longitud periférica igual al perímetro del área circular humedecida superficialmente. Una aproximación resulta:

$$P_w = \frac{E As + S'e/2 \times Ps}{Sp \times Sr} \quad (21)$$

Donde:

- As: Área superficial humedecida por el microaspersor (m^2)
- Ps: Perímetro del área superficial humedecida (m)
- S'e: tomada de la tabla para un suelo homogéneo (m)
- e: Número de microaspersores por planta

Sp y Sr: Distancia entre planta y entre hileras de planta

DENSIDAD DE SIEMBRA

La densidad de siembra, distancia entre hileras x distancia entre plantas, en riego localizado viene dada por la integración de factores tales como las labores culturales (distancia entre hileras, Sr) y la competencia por la luz y aire (distancia entre plantas, Sp). La competencia radical pierde importancia debido a la suplencia de nutrimentos y agua en dosis y frecuencia elevadas. Bajo esas condiciones, es posible incrementar substancialmente la densidad de siembra.

PROFUNDIDAD RADICAL

En riego por goteo las raíces se concentran en los bulbos de humedecimiento, la profundidad esperada de raíces (z) viene dada por la longitud vertical del bulbo. La profundidad radical será aquella programada de acuerdo a la textura del suelo y alas características de la aplicación. En suelos húmedos, durante la estación lluviosa las plantas perennes modifican su patrón de crecimiento radical, uniformizando la densidad en todo el área explorada. En la próxima estación seca, se activan nuevamente las raíces correspondientes a los bulbos húmedos, las cuales vuelven a funcionar a toda intensidad, el resto entrarán en dormancia hasta la próxima estación lluviosa.

En los cultivos de porte arbóreo las raíces cumplen también con la función de anclaje de la planta función muy importante sobre todo en zonas de altas velocidades de viento. La disposición de los bulbos debe realizarse de forma equilibrada a fin de proveer a la planta de un anclaje balanceado, pensando en las direcciones prevalecientes de la medida en que la precipitación anual es más escasa; además algunos cultivos son susceptibles a este problema, tal el caso de las cítricas.

La microaspersión elimina estos inconvenientes. Para efectos de diseño se puede emplear como profundidad radical (z) aquella recomendada para los sistemas convencionales de riego.

CONSIDERACIONES PRACTICAS SOBRE EL DISEÑO AGRONOMICO

No cabe duda de que el diseño agronómico es la parte más compleja de todo el diseño de riego. Las

decisiones que aquí se toman requieren muchas veces de hacer asunciones que requieren, en alguna medida, de cierto grado de experiencia. En el diseño agronómico quedaron establecidos parámetros que involucran al suelo, con todo su heterogeneidad, y a la planta que, como ser vivo puede tornarse impredecible en cuanto a la respuesta ante determinadas situaciones o parámetros.

En el diseño agronómico quedan establecidos 1.- El tipo de emisor, 2.- El caudal del emisor, 3.- El número de emisores por planta. 4.- La disposición de los emisores con respecto a la planta y 5.- Los parámetros de operación: tiempo de riego y frecuencia de riego.

En el caso de cultivos perennes, de porte arborio, en una práctica común ir incrementando el número de emisores por árbol, en la medida en que la planta va creciendo. Por ejemplo, colocar dos goteros por cada árbol durante el primer año; cuatro el segundo año y así sucesivamente. Hacia la madurez, los goteros pueden reemplazarse por micro aspersores. Es de hacer notar que solamente los goteros de inserción colocados sobre la línea, permiten este tipo de manejo. Al final los goteros pueden ser sustituidos por tapones diseñados para tal fin cuando sea necesario. Todos estos cambios deben ser previstos en el diseño hidráulica inicial.

Con respecto al espaciamiento entre emisores, la mejor decisión es aquella que provenga de una medida directa en el campo, es algo muy sencillo de realizar y permite obtener información confiable en cuanto Se y S'e.

En general, en cultivos de frutales existen tres categorías, en cuanto a densidad de siembra:

- **Densamente espaciados**, plantas con espaciamiento sobre la hilera no mayor de 3m.
- **Espaciamiento medio**, plantas con espaciamiento no mayor de 6m.
- **Ampliamente espaciados**, con espaciamiento mayor a 6m sobre la hilera.

La densidad de siembra en estos cultivos es un factor intrínseco del cultivo y de las labores culturales asociadas a él; el sistema de riego por goteo deberá adaptarse a esta situación.

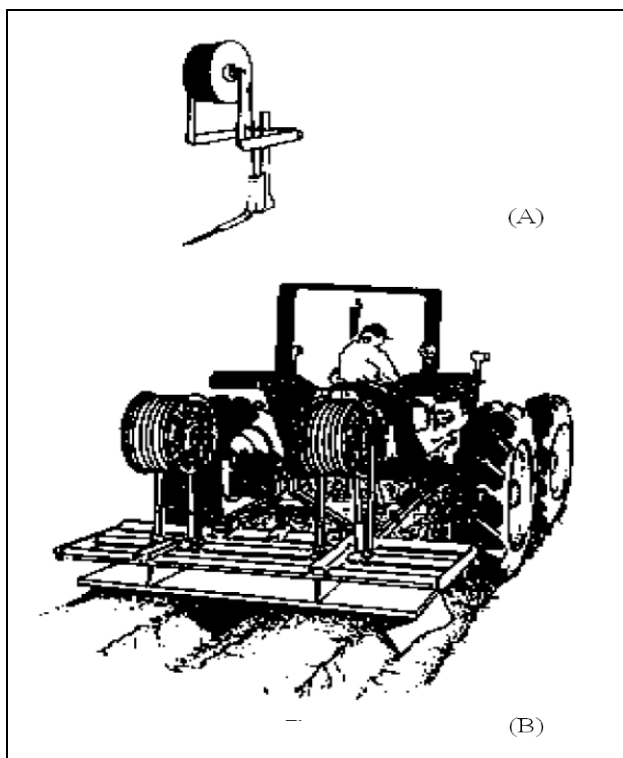
Cultivos estacionales

Los cultivos estacionales son de bajo porte, densamente sembrados, con raíces superficiales o poco profundas. Se caracterizan porque, una vez con-

cluido su ciclo, el campo debe limpiarse y prepararse para la próxima estación. Bajo estas condiciones es aconsejable un equipo de bajo costo que pueda desecharse, suficientemente barato para permitir su destrucción. El hecho de utilizarlo una sola vez eliminaría problemas de taponamiento durante el almacenamiento, así como la distribución de la uniformidad de distribución de los caudales de los goteros. Existen en el mercado equipos mecanizados capaces de distender rápidamente las tuberías laterales sobre el campo de riego. La figura 5a muestra un claro ejemplo de estos equipos.

Hortalizas

Todos los cultivos agrícolas permiten regarse eficientemente con riego por goteo, las hortalizas se caracterizan por ser cultivadas en áreas relativamente pequeñas, con prácticas culturales muy intensivas se pueden plantar una o dos hileras para cada línea lateral dependiendo de la naturaleza del cultivo y del tamaño de las plantas adultas. Por razones económicas, es recomendable sembrar en camas con dos hileras de plantas por cada línea de goteros.



Figuras 5a. Sistemas automatizados para la distensión de laterales de riego por goteo:
A.- Implemento para ser montado sobre barra portaimplemento. B.- Conjunto implemento – tractor en operación.

En **tomate** el riego por goteo presenta innumerables ventajas. En este caso, la planta tiene raíces bastante profundas, tiene tamaño considerable, por lo que se utiliza una línea de goteros por cada hilera de plantas, sobre todo cuando se cultivan empalados. El tomate es sensible a la falta de aireación en el suelo y propenso a enfermedades cuando el follaje es humedecido.

La **berenjena** tolera tensiones bastante altas (entre 1 y 2 atm.), pero produce excelentes resultados a bajas tensiones de humedad. Se siembra en hileras dobles por cada línea lateral, con aplicaciones diarias utilizando $ET = 0.7$ Ev (Tina).

En cuanto a las **cucurbitáceas**, se han obtenido excelentes resultados, en cuanto al rendimiento y calidad de los frutos, cuando se riega por goteo utilizando hileras simples por cada línea de riego.

Las **fresas** y las **flores** se vienen sembrando con coberturas plásticas de 1.20 m de ancho. En las camas (Figura 6) las hileras dobles espaciadas entre sí 60 cm, llevan las hileras de goteros por el centro bajo la película plástica, en la cual se han perforado agujeros pareados a cada lado de la tubería de goteros, en concordancia con el espaciamiento de siembra establecido. Las plántulas se siembran a través de estos agujeros.

La **caña de azúcar** es otro cultivo en el cual el riego por goteo ha venido ganando espacio. Se acostumbra quemarla antes del corte, a fin de eliminar el material vegetativo no productivo y hacer más eficiente el acarreo y transporte. El proceso de corte y quemado impide el uso de riego localizado superficial, por esa razón, se utilizan sistemas enterrados entre 30 y 45 cm de profundidad, con laterales de bajo costo para que duren el tiempo que dura la soca (máximo tres temporadas) (figura 6). Laterales de paredes delgadas (entre 100 y 400 μ m) del tipo biwal se han venido utilizando para tal fin. Últimamente se han introducido los nuevos sistemas integrales israelitas (tipo Tiran, Tiphon, Naan Paz, Queen Gill 10, etc.) de 2 a 3 lt/h, también de paredes delgadas para permitir ser económicamente desechables. Se utilizan hileras apareadas sobre el lateral, con un consumo $ET = (0.7$ hasta 1.0) Ev. En Venezuela se ha venido utilizando este método desde el principio de los 80, en la zona del Estado Lara.

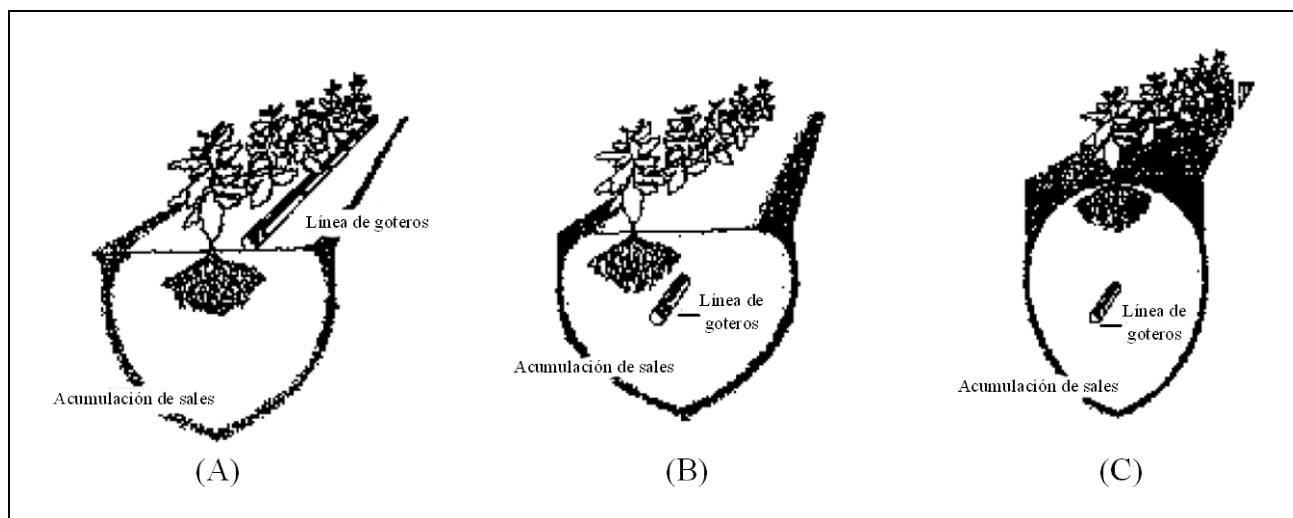


Figura 6. Diferentes posiciones de colocación de la línea lateral: A.- Superficial, B.- Profundidad Somera y C.- Profundo (30 a 45 cm).

II. DISEÑO HIDRAULICO

La red de tuberías a través de las cuales el agua a presión es llevada desde la fuente de agua hasta distribuirla en todo el campo de riego, constituye la red e distribución, donde uno de los elementos claves es el emisor.

LOS EMISORES

Los emisores son tal vez los componentes más importantes de la red de distribución, pero por ser una estructura hidráulica que puede ser muy complicada, son también los más delicados.

Toda la dificultad de su diseño constructivo reside en el siguiente problema: los emisores deben proporcionar un caudal bajo, con objeto de que los diámetros de las tuberías, sobre todo laterales y terciarias, sean reducidos: las grandes longitudes que de estas tuberías se emplean en los sistemas de riego localizado hacen que un ligero incremento en su diámetro encarezca de forma importante la instalación. Por otra parte, la presión de servicio de los emisores no debe ser muy baja para minimizar el efecto que sobre la uniformidad del riego tienen los desniveles del terreno y las pérdidas de carga a lo largo de terciarias y laterales. Ambas condiciones, caudal bajo y presión alta conducen, desde un punto de vista exclusivamente hidráulico, a emisores en los que el paso del agua sea pequeño, pero ello está en contradicción con otra condición que han de cumplir los emisores, su diámetro

de paso ha de ser lo mayor posible con objeto de evitar las obturaciones, que son el principal problema en el manejo de los sistemas de riego localizado. Esta contradicción es resuelta por los fabricantes de forma muy variada e ingeniosa y en consecuencia existen en el mercado muchos tipos de emisores.

Definiciones

Emisores

Son los dispositivos que controlan la salida de agua, desde las tuberías laterales, en puntos discretos o continuos.

Punto de emisión

Son los orificios de salida del agua procedente de los emisores. Cuando el mismo dispone de varios puntos de emisión, se denomina "*Emisor de Salida Múltiple*".

Gotos

Son emisores con caudales no superiores a 16 l/h. En ellos se produce una disipación de energía que para caudales inferiores a 8 l/h es casi total, por lo que el agua sale "*gota a gota*" y para caudales mayores conserva parte de la energía saliendo el agua en forma de pequeños "*chorros*".

Sistema integrados

Se trata de conducciones que a su vez aplican agua de riego mediante perforaciones poco espaciadas (generalmente menos de 0.50m), pared porosa, etc. El caudal que descargan no sobrepasa los 16 l/h por metro lineal de conducción. La unidad de emisión es el tramo de tubería emisora, repetido a intervalos, desde el que fluye agua al exterior.

Cuando se utilizan goteros o tuberías emisoras, el principal medio de propagación del agua es el suelo.

Difusores

Llamados también aspersores estáticos, son emisores por cuyo orificio de salida se lanza el agua al exterior con la suficiente presión para permitir su difusión a través del aire, tras incidir el chorro en un deflector fijo.

Miniaspersores

Son aspersores de baja presión y caudal. El radio de alcance es pequeño, normalmente no superior a los 3 m.

Tanto los difusores como los miniaspersores tienen caudales que no sobrepasan los 200 l/h. En este caso el aire es el principal medio de propagación del agua.

La mayoría de los emisores trabajan a una presión próxima a los 10 m (1 Bar), aunque los de alto caudal pueden hacerlo a 20 m y, en el otro extremo, las cintas de exudación trabajan entre 1 y 3 m. Los caudales varían entre 2 y 16 l/h., con las mismas excepciones que para la presión; los de alto caudal pueden llegar a 150 l/h, y las cintas de exudación a menor de 0.5 litros por hora y metro lineal.

Requerimientos básicos de un emisor

Las características fundamentales que se deben tener presentes al seleccionar un emisor son:

- Caudal uniforme y constante, poco sensible a las variaciones de presión.
- Poca sensibilidad a las obturaciones.
- Elevada uniformidad de fabricación.
- Resistencia a la agresividad química y ambiental, así como a las operaciones agrícolas.
- Bajo costo.

- Estabilidad de la relación caudal - presión a lo largo del tiempo.
- Poca sensibilidad a los cambios de temperatura.
- Reducida pérdida de carga en el sistema de conexión.
- Resistencia al ataque de insectos y/o roedores.

Algunos de estos requerimientos se parametrizan a continuación para facilitar la definición y, en su caso, selección del emisor.

Hidráulica de los emisores**Régimen hidráulico**

Se toma como ejemplo una tubería transparente de 10 cm de diámetro por la que circula un líquido viscoso, aceite por ejemplo. en un extremo de la tubería, en varios puntos de su sección transversal, se aplica un colorante. Si la velocidad del aceite es muy lenta, a lo largo de la tubería aparecerán unas líneas parentales coloreadas, sin mezclarse con las zonas sin color. En una situación como la descrita se dice que el régimen hidráulico es laminar. Si la velocidad del aceite se va aumentando, para valores altos de la misma desaparece esa separación entre líneas coloreadas y zonas sin colorear: el líquido se ha mezclado y presenta un color homogéneo en toda la sección. Ahora el régimen se denomina turbulento. Este sencillo ejemplo nos sirve de introducción a un tema tradicionalmente árido, el número de Reynolds.

El número de Reynolds

En todo fluido en circulación existen unas fuerzas de inercia [según la ley de Newton, (fuerza = masa x aceleración)] y unas fuerzas de rozamiento interno entre las partículas del fluido. La relación entre ambas fuerzas es un número adimensional, y en 1883 Osborne Reynolds comprobó que ese número permitía definir el régimen hidráulico.

En cualquier manual de hidráulica se puede encontrar la deducción de ese número adimensional que se denomina número de Reynolds y que se representa por Re:

$$Re = \frac{dv}{\nu} \quad (1)$$

Donde:

- d: Diámetro en metros

v: Velocidad de agua en m/sg
 υ: Viscosidad cinemática del agua en m²/sg

$$\nu = \frac{n}{p} \quad (2)$$

Donde:

n: Viscosidad dinámica del agua en Kg/m . sg
 p: Densidad del agua en kg/m³

Si en la fórmula (1) se sustituye:

$$v = \frac{4q}{\pi d^2} \quad (3)$$

se obtiene:

$$Re = \frac{4q}{\pi d \nu} \quad (4)$$

q en m³/sg
 d en metros
 υ en m²/sg
 d en mm
 q en l/hr

Para t = 20°C, υ = 1.003 • 10⁻⁶ m²/sg y la (4) se simplifica en:

$$Re = 352,64 \frac{q}{d} \quad (5)$$

$$V = 0.354 \frac{q}{d} \quad (6)$$

Ejemplo 1.

Por una tubería de diámetro interior d = 28 mm circula un caudal q = 1.620 l/h a una temperatura de 20°C. Calcular v y Re.

Aplicando (5) y (6):

$$V = 0.354 \frac{1.620}{28^2} = 0.73 \text{ m/sg}$$

$$Re = 354,64 \frac{1.620}{28} = 20.402$$

El número de Reynolds permite clasificar el régimen hidráulico en tres clases, laminar, crítico o inestable y turbulento (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de regímenes hidráulicos.

Re	Régimen
< 2.000	Laminar
2.000 – 4.000	Crítico o inestable
> 4.000	Turbulento
	liso intermedio Rugoso

Cuando Re es menor de 2.000 el régimen es laminar; para Re mayor de 4.000 el régimen es turbulento; para valores intermedios el régimen se comporta unas veces como laminar y otras como turbulento; por eso se denomina inestable, aunque también recibe el nombre de crítico. Como se ve en el Cuadro 1, el régimen turbulento se divide en tres clases. Esa división no se hace en función de Re sino de determinadas características del material de que está constituida la tubería.

La importancia práctica de conocer el régimen hidráulico reside en que para cada régimen son distintas las fórmulas que relacionan la presión con la velocidad, es decir, las que permiten resolver los problemas más frecuentes de hidrodinámica tales como cálculo de pérdidas de carga, cálculo del caudal en función de la presión disponible, etc. pero además de estas aplicaciones, el régimen hidráulico tiene unas consecuencias prácticas sobre el funcionamiento de los emisores que se pueden resumir diciendo que el régimen laminar es inconveniente por las razones siguientes:

1. En régimen laminar la pérdida de carga a lo largo de una conducción no depende de la rugosidad de la misma y sí de la viscosidad cinemática y por tanto de la temperatura, Figura 1.
2. En régimen laminar la relación entre pérdida de carga y velocidad es lineal o, lo que es lo mismo, la relación entre caudal y presión en un emisor es lineal. En cambio en régimen turbulento la relación es del tipo exponencial:

$$q = Kh^x$$

Donde:

x = 1 en régimen laminar
 x < en régimen turbulento

3. Para que emitan el mismo caudal, los emisores en régimen turbulento necesitan menor diámetro de paso que los de régimen laminar, lo que en principio es una ventaja de estos últimos desde el punto de vista de la prevención de obturaciones. Sin embargo, la velocidad del agua en el régimen turbulento es muy superior, con lo que el riego de sedimentación disminuye. La acción conjunta de estos dos hechos muestra un balance favorable a los emisores turbulentos también en lo referente a las obturaciones.

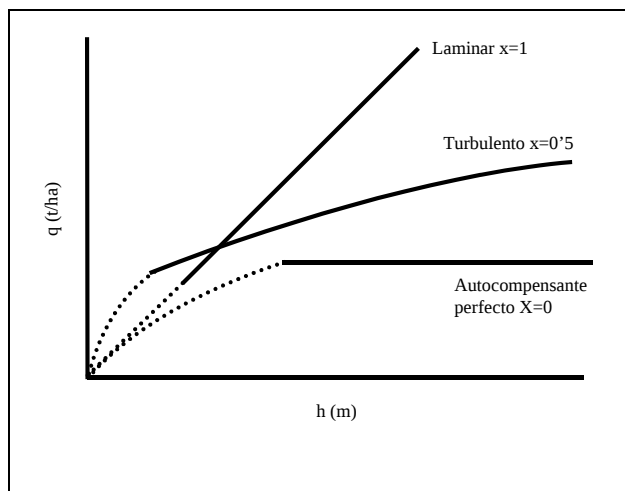


Figura 1. Relación q – h.

Relación caudal – presión

Tal como se dijo anteriormente, cualquiera que sea el tipo de emisor, salvo las cintas de exudación, entre el caudal emitido y la presión de servicio existe la siguiente relación, denominada ecuación característica del emisor:

$$Q = Khx \quad (7)$$

Donde:

- q: Caudal del emisor, que generalmente se mide en litros/hr (l/h).
 K: Coeficiente de descarga.
 x: Exponente de descarga.
 h: Presión a la entrada del emisor, que generalmente se mide en metros de columna de agua (m).

los valores de K y x son característicos de cada tipo de emisor. Con frecuencia los fabricantes sólo informan acerca de un punto de la ecuación del emisor, pero debe exigírseles que proporcionen la fórmula (7) con los valores numéricos de k y x, así como el entorno de esa curva a tabla se puede de-

ducir la ecuación del emisor, aplicando las fórmulas siguientes a dos pares de valores:

$$x = \frac{\ln(q_1/q_2)}{\ln(h_1/h_2)} \quad (8)$$

$$x = \frac{q_1}{h_1^x} \quad (9)$$

Ejemplo 2.

Determinar la ecuación y las características de un emisor si se tienen los siguientes datos:

$$h_1 = 10\text{m}; q_1 = 2.15 \text{ l/h}$$

$$h_2 = 8.5 \text{ m}; q_2 = 1.92 \text{ l/h}$$

$$x = \frac{\ln(2.15/1.92)}{\ln(10/8.5)} = 0.70$$

$$K = \frac{3.89}{10^{0.70}} = 0.78$$

la ecuación del emisor es: $q = 0.78 h^{0.70}$

Coeficiente de variación por fabricación

Por muy esmerados que sean los procesos de fabricación de los emisores, es imposible obtener con el mismo valor de K y x.

Si se toma una muestra de 50 emisores del mismo tipo y se someten a idéntica presión hidráulica, sin que varíe la temperatura del agua, el caudal de cada uno de ellos será distinto. Se ha comprobando que con un número suficientemente grande de emisores sus caudales se distribuyen estadísticamente, según una distribución normal. Esta distribución estará, por tanto, definida por su media y desviación típica. Si se llama q_a a la media de todos los caudales medidos a la misma presión y temperatura y σ su desviación típica, se puede definir el coeficiente de variación por fabricación v como:

$$v = \sigma/q_a \quad (10)$$

Siendo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1 I q_1 - q_a^2}{n-1}} \text{ y } q_a = \frac{\sum_1 q_1}{n} \quad (11) (12)$$

Donde:

σ : Desviación típica o normal
 q_a : Caudal del emisor
 n : Número de emisores

La norma ASAE EP405.1 basa en la del US Soil Conservation Service clasifica los emisores de acuerdo con los valores del CV en:

Goteros, miniaspersores y difusores:

	v	$\leq$	0.05	Excelente
0.05	$< v$	$\leq$	0.07	Normales
0.07	$< v$	$\leq$	0.11	Marginales
0.11	$< v$	$\leq$	0.15	Deficientes
				Inaceptables

Tuberías emisoras de goteo:

	v	$\leq$	0.10	Excelente
0.10	$< v$	$\leq$	0.20	Normal
0.20	$< v$	$\leq$		Deficientes
				Inaceptables

En la práctica del riego, el dato realmente importante es la diferencia de dosis de riego que reciben las plantas. Por tanto, en el caso que cada planta recibe el agua de más de un emisor, se define el coeficiente de variación del sistema v , por:

$$V_g = \frac{v}{\sqrt{e}} \quad (13)$$

en la que:

V_g : Es el coeficiente de variación por fabricación del sistema.
 v : Es el coeficiente de variación por fabricación del emisor.
 e : Es el número de emisores que proporcionan agua a una planta.

Es importante reseñar que en cultivos de alta densidad de plantación, aunque haya más plantas que emisores, por lo poco espaciado que normalmente se encuentra éstos, cada planta puede recibir agua de dos o tres emisores y ésta es la cifra que deberá tomarse como valor de (e) .

Cuando se trata de goteros multisalida debe saberse si se trata de un gotero con varios puntos de emisión o de varios goteros agrupados en una misma carcasa. En este caso e sigue siendo el número de goteros independiente de los puntos de emisión que tenga. Siempre debe aplicarse el mismo criterio que se utilizó al hacer la determinación del v en laboratorio.

En general, puede decirse que el coeficiente por variación de fabricación es prácticamente independiente de la presión usada en la prueba, siempre que éste esté comprendida en el entorno normal de uso de emisor. Frecuentemente los emisores que son desmontables tienen un alto coeficiente de variación por fabricación, así como los llamados autocompensados. La influencia del v en la variación de caudales en la subunidad de riego suelo ser más importante que la variación de presiones debida a la pérdida de carga en las tuberías, incluso para valores realmente bajos de v .

Hasta ahora el v definido se refiere a emisores recién fabricados, nuevos. Es muy interesante conocer el v de emisores usados, en unas determinadas condiciones o bien su variación con el tiempo. Lógicamente éste se verá afectado por las obturaciones parciales o totales y/o envejecimiento de los materiales de que estén fabricados los emisores. Por ejemplo, con sólo un 5% de emisores totalmente obturados, v pasaría de 0.05 a 0.24, si se usan uno por planta.

Sensibilidad a las obturaciones

La sensibilidad del emisor a las obturaciones para una misma calidad de agua depende fundamentalmente del diámetro de su sección mínima de paso, de la velocidad del agua a través de esta sección y de la configuración o diseño de la misma.

Según el diámetro de la sección mínima de paso, los goteros, tuberías emisoras y sistemas integrados pueden clasificarse en:

Muy sensibles a las obturaciones	$d \leq 0.7 \text{ mm}$
Sensibles	$0.7 < d \leq 1.5 \text{ mm}$
Poco sensibles	$d \leq 1.5 \text{ mm}$

La presencia de zonas muertas en los conductores del agua dentro del emisor puede aumentar su sensibilidad a las obturaciones. La velocidad dentro de los conductores de emisor tiene tanta importancia como el diámetro. Velocidades mayores de 4.5 m/s reducen mucho las obturaciones.

En general, se recomienda que el sistema de filtrado no deje pasar partículas sólidas, cuyo diámetro sea superior a 1/10 del diámetro de la sección mínima de paso a goteros. En miniaspersores y difusores esta norma puede rebajarse a 1/5, ya que la velocidad de paso por los conductores suelo ser mayor y éstos más cortos.

Para difusores y miniaspersores se puede establecer la siguiente clasificación:

Muy sensibles a las obturaciones	$d \leq 0.4 \text{ mm}$
Sensibles	$0.4 < d \leq 0.7 \text{ mm}$
Poco sensibles	$d \leq 0.7 \text{ mm}$

La clasificación más importantes de los goteros es aquella que toma en consideración el mecanismo hidráulico para disipar la energía. De acuerdo a este criterio los goteros pueden clasificarse en:

- Goteros de larga trayectoria.
- Goteros de orificio.
- Helicoidales.
- De laberinto.
- Gotero vortex.
- Gotero autocompensante.
- Gotero de doble ducto.
- Cinta de exudación.

TUBERIAS, ASPECTOS GENERALES

Definiciones

Presiones

Presión nominal (Pn). Es la presión que sirve para tipificar, clasificar y timbrar tanto los tubos como las piezas especiales. Las normas UNE la definen como “valor de la presión interna para la

que se ha diseñado el tubo con un coeficiente de seguridad que puede mantenerse sin fallos durante 50 años, teniendo en cuenta un método de extrapolación definido en condiciones estáticas, para una sección dada del tubo que contiene agua a 20°C. El coeficiente de seguridad tiene en cuenta las fluctuaciones de los parámetros que se pueden producir normalmente durante el uso continuo del material”.

Presión de trabajo (Pt). “Es el valor de la presión interna máxima a la que en servicio puede estar sometido un tubo a la temperatura de utilización”.

Según las normas UNE, las presiones se expresan en megapascuales ($1 \text{ Mpa} = 10 \text{ kg/cm}^2$), pero la práctica sigue utilizando otras unidades como atm.

Diámetros

En las tuberías de plástico el diámetro nominal (D_n) es el exterior, y se puede considerar como el diámetro teórico declarado por el fabricante, a partir del cual se establecen las tolerancias y que sirven de referencia para designar por medidas los distintos elementos de una conducción acoplable entre sí. Se expresa en mm. Las normas UNE definen además los diámetros y espesores siguientes:

Tuberías plásticas

Tuberías de PVC

Son tubos de plástico rígido fabricados a partir de una materia prima compuesta esencialmente de resina sintética de policloruro de vinilo (PVC) técnico, mezclada con la proporción mínima indispensable de aditivos colorantes, estabilizantes y lubricantes y exenta de plastificantes y materias de relleno (fillers).

Tabla 2. Unidades de presión.

	atm	kgf/cm ²	bar	m.c.a.	Psl	P _a
Atmósfera	1	1.033	1.0131	10.33	14.70	1.01×10^5
kgf/cm ²	0.9678	1	0.98	10.00	14.22	98.000
bar	0.987	1.02	1	10.20	14.5	10^5
m.c.a.	0.096	0.10	0.098	1	1.42	10^4
psl	0.068	0.0703	0.0689	0.7031	1	7.142
P _a	0.987×10^{-5}	0.102×10^{-4}	10^{-4}	10^{-5}	0.00014	1
psl = libras por pulgada cuadrada Pa (pascal) = newton/m² 1 Mpa = 10^6 Pa newton/mm² = 10.2 kgf/cm² = 102 m.c.a. 1 kPa = 10^3 Pa = 0.0102 kgf/cm² = 0.102 m.c.a.						

Tabla 3. Tubos de Polietileno

A. Normalizados (D_1 en mm)							B. No normalizados	
D_n (mm)	PE 32 (baja densidad)			PE 50 B (media densidad)			D_n (mm)	$P_1=2.5\text{atm}$ D_1 (mm)
	P_n 4 atm	P_n 6 atm	P_n 10 atm	P_n 4 atm	P_n 6 atm	P_n 10 atm		
10			6.0			6.0	3.0	2.0
12			8.0			8.0	4.5	3.0
16		12.0	11.6			12.0	6.0	4.0
20		16.0	14.4			16.0	12.5	10.3
25	21.0	20.4	18.0		21.0	20.4	16.0	13.2
32	28.0	26.2	23.2		28.0	26.2	18.5	16.0
40	35.2	32.6	29.0	36.0	35.2	32.6	32.0	28.8
50	44.0	40.8	36.2	46.0	44.0	40.8	40.0	36.8
63	55.4	51.4	45.8	58.2	55.4	51.4	50.0	46.6
75	66.0	61.4	54.4	69.2	66.0	61.4	63.0	57.8
90	79.2	73.6	65.4	83.0	79.2	73.6		
110	96.0	90.0	79.8	101.6	96.8	90.0		
125	110.2	102.2	90.8	115.4	110.2	102.2		

1 atm. = 1.1 Mpa
 e (espesor) = $(D_n - D_1)/2$
Pizarro, 1990

Se fabrican con dos tipos de juntas: por encolado, que se utiliza para diámetros no superiores a 160 mm y por juntas elásticas, cuya estanqueidad es superior.

No se puede utilizar al aire libre porque la acción de los rayos solares descompone los polímeros del PVC.

Tuberías de polietileno

El polietileno (PE) es un plástico derivado de etileno, al que se somete a un proceso de calor y presión que provoca su polimerización. Las tuberías de polietileno se fabrican mediante extrusión.

El enorme impulso de los Riegos Localizados en los últimos años se debe en gran parte al desarrollo de las tuberías de PE, que presenta dos ventajas respecto al PVC: se puede instalar al aire libre y es flexible y mucho menos frágil. El PE es más caro que el PVC, ya que, debido a su menor esfuerzo tangencial de trabajo (σ), para un mismo D_n y P_n se necesita mayor espesor. También los accesorios de las tuberías de polietileno son más caros. En resumen, el PE sustituye al PVC en conducciones a la intemperie y en algunos casos de conducciones enterradas (diámetros muy pequeños y conexiones frecuentes con otras tuberías de PE).

Las propiedades del polietileno dependen de su peso molecular, densidad y distribución estadística de los pesos moleculares de sus diferentes macromoléculas. Comercialmente se fabrican tres tipos de tubos de polietileno.

Hidráulica de las tuberías

Uno de los problemas más estudiados en la hidráulica de tuberías es la relación cuantitativa que existe entre las siguientes magnitudes:

- q: Caudal
- d: Diámetro
- v: Velocidad del agua
- I: longitud e la tubería
- Hf: Pérdida de carga por fricción

$$J = \frac{H_f}{I} : \text{Pérdida de carga unitaria} \quad (14)$$

Esta última no tiene dimensiones y se puede expresar en tanto por uno (p. ej. m/m) o en tanto 100 (m/100 m). Muchas tablas y ábacos en que J se expresa en tanto por 100

Fórmulas adecuadas para riegos localizados

En lo que sigue se emplean preferentemente las siguientes unidades, a menos que se indique lo contrario:

q: l/h
d: mm
v: m/sg
Hf y I: m

En las fórmulas en que intervienen la viscosidad cinemática ν , ésta se expresa en m^2/sg . La mayoría de las fórmulas se presentan con los coeficientes adecuados para el valor $\nu = 1.003 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{sg}$, correspondiente a 20°C .

Se empieza por recordar las expresiones de números de Reynolds explicadas anteriormente.

Unidades	Re
	$\frac{d \cdot v}{\nu}$
Mm/sg	$\frac{q}{d \nu}$
mm1 l/h	$3.537 \cdot 10^4 \frac{q}{d \nu}$
mm1 l/h para 20°C	$352.64 \frac{q}{d}$

Las fórmulas de tuberías son diferentes según el régimen hidráulico, el cual se puede clasificar en:

Re	Régimen
< 2.000	laminar
2.000 – 4.000	crítico o inestable
> 4.000	turbulento
	liso
	intermedio
	rugoso

La fórmula de Darcy-Weisbach es universal, en el sentido de que se puede aplicar a todos los regímenes.

$$J = f \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

Las unidades son: $d(\text{m})$, $v(\text{m/sg})$ y $g = 9.81 \text{ m/sg}^2$. El factor “f” es el coeficiente de fricción, factor adimensional, el cual es lo que realmente varía en

función del régimen hidráulico. En las unidades usuales en riego localizado (q en l/h y d en mm), la 1(15) toma la forma.

$$J = 6.35 \cdot f \cdot \frac{q^2}{d^5} \quad (16)$$

Adecuación de la fórmula de Darcy-Welsbach a los distintos regímenes hidráulicos

Régimen laminar ($\text{Re} < 2.000$)

En este caso “f” es independiente de la rugosidad de la tubería y depende únicamente del número de Reynolds, según:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (17)$$

Introduciendo (17) en (16) se obtiene la fórmula de Hagen-Poiseuille.

$$J = \frac{64}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (18)$$

Con d (m) y v (m/sg), o sus equivalentes:

$$J = 1.153 \cdot 106 \cdot \frac{q}{d^4} \quad (19)$$

con q (l/h) y d (mm), fórmula que para $t = 20^\circ\text{C}$ se transforma en:

$$J = 1.16 \cdot \frac{q}{d^4} \quad (20)$$

Ejemplo 1.

Calcular la pérdida de carga de una tubería de PEBD de $d = 21.8 \text{ mm}$, $I = 100 \text{ m}$, con caudal de 96 l/h .

En primer lugar se comprueba el régimen hidráulico:

$$\text{Re} = 352,64 \cdot \frac{q}{d} = 352,64 \cdot \frac{96}{21,8} = 1.553$$

El régimen es laminar. Se aplica la (7) para el cálculo de J:

$$J = \frac{q}{96}$$

$$H_p = J \times 1 = 1.16 \cdot \frac{1}{d^4} \cdot 1 = 1.16 \frac{1}{21.8^4} \cdot 100 = 1.0049 \text{ m}$$

Régimen crítico (2.000 < Re < 4.000)

En este régimen, “*f*” depende también únicamente de Re, pero la relación que liga ambos factores ya no es la de Hagen-Poiseuille. El flujo es inestable. Unas veces se comporta como laminar y otras como turbulento. El valor de *f* se debe determinar experimentalmente en cada caso, pero con tuberías de plástico (PVC ó PE), se cumple con errores menores del 2 por 100 la aproximación que Blasius dedujo para el régimen turbulento liso:

$$f = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \quad (21)$$

Con lo que la (16) queda:

$$J = 0.025 v^{0.25} d^{-4.75} q^{1.75} \quad (22)$$

O su equivalente para *t* = 20°C

$$J = 0.00078 d^{-4.75} q^{1.75} \quad (23)$$

Con *d* (m) y *q* (m³/sg). Con las unidades *d* (mm) y *q* (l/h):

$$J = 0.025 v^{0.25} d^{-4.75} q^{1.75} \quad (24)$$

Y para *t* = 20°C

$$J = 0.473 d^{-4.75} q^{1.75} \quad (25)$$

Ejemplo 2.

Calcular *J* para *d* = 10.3 mm y *q* = 72 l/h.

$$\text{Re} = 352.64 \cdot \frac{q}{d} = 2.465 : \text{régimen crítico. Aplicado (25)}$$

$$J = 0.473 (10.3)^{-4.75} \cdot (72)^{1.75} = 0.01301 \text{ m/m}$$

Régimen turbulento

A medida que el número de Reynolds crece, el régimen se hace turbulento y *F* se ve afectado cada vez menos por Re y cada vez más por la rugosidad de la tubería. En rigor, en esta situación hay que distinguir entre los tres tipos de regímenes turbulentos (liso, intermedio y rugoso) y para ello hay que recurrir a un diagrama como el de Moody o similar. Sin embargo, se consigue una aproximación suficiente con las fórmulas siguientes:

$$4.000 < \text{Re} < 10^5$$

Se aplican las fórmulas de Blasius ya descritas (22), (23), (24) y (25).

$$10^5 < \text{Re} < 10^6$$

Se aplica la fórmula de Veronese-Detel, con la modificación del coeficiente propuesto en las normas ISO₁ y que para *t* = 20°C son.

$$J = 0.000894 d^{-4.80} q^{1.80} \quad (26)$$

Con *d*(m) y *q*(m³/sg)

$$J = 0.355 d^{-4.80} q^{1.80} \quad (27)$$

Con *d*(mm) y *q*(l/h).

TUBERIAS DE LA RED DE DISTRIBUCION

La red de distribución es un componente fundamental de todo sistema de riego. En riego localizado está constituido por la serie de tuberías presurizadas que toman el agua desde la fuente de energía (bomba), la llevan hasta el campo de riego (mediante la tubería de aducción) y la distribuyen a través de todo el cultivo, entregándole una dosis definida a cada planta, utilizando para ello las estructuras hidráulicas descritas previamente, llamadas emisores. El diseño agronómico debe definir el caudal y la disposición de los emisores en el campo, así mismo el tiempo y frecuencia de riego.

La figura 2 muestra las diferentes formas de disponer la red de tuberías que componen las parcelas de riego. La figura 2ª muestra la forma más sencilla de disposición, en la cual la línea terciaria (múltiple) se ubica en el eje central más largo del terreno, con laterales a ambos lados. El agua proveniente de la fuente mediante una tubería presurizada, descarga en el cabezal de control donde se encuentran. El sistema de filtrado, la inyección de fertilizantes, los controles y el regulador de presión. En las figuras 2B, 2C y 2D, se muestran sistemas un tanto más complejos, con 2, 4 y 6 subunidades de riego, respectivamente. La figura 2, también muestra la distribución de caudales en una subunidad de riego. Una subunidad de riego se define como el área dominada por un regulador de presión; está constituida por una tubería múltiple (o terciaria) con su ramal de baterías laterales. Cuando la topografía es uniforme, las subunidades de riego tienen un dimensionamiento uniforme.

La unidad de riego está formada por el conjunto de subunidades que riegan simultáneamente. El caudal total del sistema lo constituye pues, el caudal de la unidad de riego.

Pérdida de carga permisible en la subunidad de riego

En el diseño de sistemas de riego a presión, es una práctica común que, para determinar el (o los) diámetros de la línea lateral, se asuma que la diferencia en caudal entre los emisores que lo constituyen, no debe superar al 10%. En el caso de aspersores y algunos goteros, el caudal responde a la ecuación de un orificio $q = C \cdot a \cdot \sqrt{2gh}$; C: coeficiente de descarga, a: área de orificio, g: gravedad y h: carga hidráulica. La presión, por lo tanto, varía con el cuadrado del caudal y un 10% de variación en caudal, es ocasionado por un 20% de variación en presión. Este principio que normaliza el diseño de las laterales en aspersión, se conoce con el nombre de “Regla del 20%”, lo cual establece que para lograr en una línea lateral un 10% de diferencia en caudal, la diferencia en presión no debe superar el 20% de la presión media de operación.

Cálculo de las pérdidas de carga permisibles

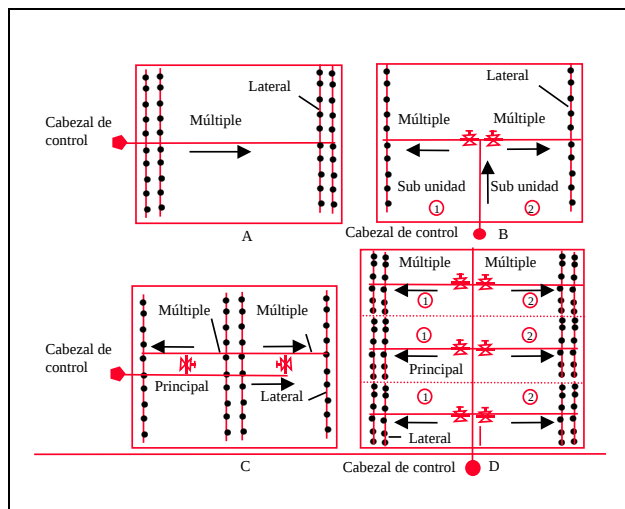


Figura 2. Esquema de la disposición de varios sistemas de riego localizado.

La subunidad de riego constituyen la mínima porción de un sistema de riego localizado, tal como se observa en la figura 3, la pérdida de carga en el conjunto (multiple-lateral), ΔH_s , es la variación de presión entre el emisor más cercano al regulador de presión y el más alejado de él.

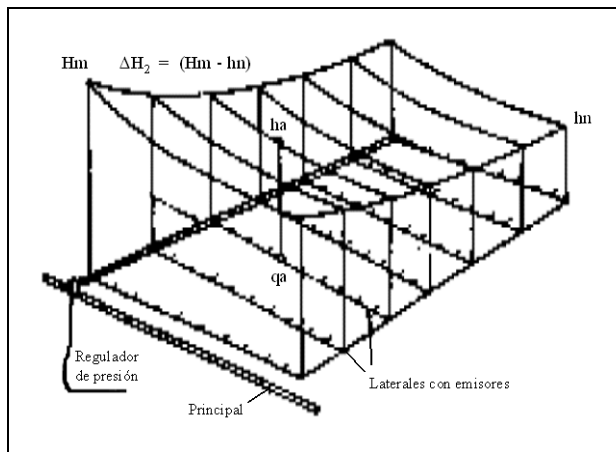


Figura 3. Distribución de presiones en una subunidad de riego (Keller, 1980).

$$\Delta H_s = H_m - h_n \quad (28)$$

Donde:

- Hm: Presión inicial en la múltiple.
 hn: Presión en el último emisor del lateral más distante de la entrada de agua.

La figura 3 esquematiza la distribución de presiones en la unidad de riego. El coeficiente de unidad CU, viene dado por:

$$CU = 100 \left(1 - \frac{1.27v}{\sqrt{e}} \right) \frac{q_n}{q_a} \quad (29)$$

Donde:

- CU: Coeficiente de uniformidad
 v: Coeficiente de variación por fabricación del emisor
 qn: Caudal mínimo, correspondiente a la presión mínima
 qa: Caudal medio de la unidad de riego (caudal medio del emisor)
 e: Número de emisores, por planta

El primer componente de esta ecuación representa la variación de caudales debido a la variación de presiones.

Con fines de diseño el valor de CU puede ser establecido tomando en consideración, principalmente la topografía del terreno y otras características del cultivo y del sistema (Keller y Karmeli, 1974:

- a Cultivos permanentes, ampliamente espaciados.
- Topografía uniforme $90 \leq Cu \leq 94$

- Pendientes fuertes u ondulaciones $88 \leq CU \leq 92$
- Para corto espaciado entre cultivos.
- b Emisores ($Se \leq 80$) en cultivos permanentes o semipermanentes.
 - Topografía uniforme $86 \leq CU \leq 90$
 - Pendientes fuertes u ondulaciones $84 \leq CU \leq 90$
- c Tuberías perforadas o de doble cámara (biwall) en cultivos estacionales sembrados en hileras.
 - Topografía uniforme $86 \leq CU \leq 90$
 - Pendientes fuertes u ondulaciones $20 \leq CU \leq 85$

De la ecuación 29, si se ha establecido el Cu de acuerdo a la normativa anterior, y conociendo el caudal promedio del emisor, se puede obtener qn:

$$q_n = \frac{q_a \cdot CU}{100 \left(\frac{1 - 1.27v}{\sqrt{e}} \right)} \quad (30)$$

El valor de q_a es el que resulta del diseño agronómico, mediante la ecuación $q = Kh^x$, característica del aspersor, de la cual si se fija q_a se obtiene:

$$h_a = \frac{q_a^{1/x}}{K} \quad (31)$$

Y con el valor de q_n obtenido del CU:

$$h_n = \frac{q_n^x}{K} \quad (32)$$

Con los valores de h_n, obtenido a partir del CU, y se h_a, obtenido de la ecuación característica del gotero, Keller recomienda el valor 2.5 como multiplicador, para obtener la pérdida de carga permisible:

$$\Delta h_s = 2.5 (h_a - h_n) \quad (33)$$

El valor de Δh_s así obtenido se considera un valor bien razonable debido a que se fundamenta en un CU preestablecido en base a algunas condiciones generales del sistema. Algunos autores recomiendan utilizar para el cálculo de Δh_s un porcentaje de h_a: Benami 30%, Pérez Rodríguez 35%. Siempre la variación de caudales será aproximadamente igual a la mitad de la variación de presiones.

El valor de Δh_s obtenido, debe ser repartido entre la lateral y la múltiple. En esta repartición tiene mucho que ver el criterio personal. Algunos utilizan 50% para uno y 50% para el otro. Otros, pensando en la influencia que tienen las laterales sobre el costo total, le dan una porción mayor a estos, por ejemplo. 60% para las laterales y 40% para la múltiple. Por ahora, las pérdidas de carga permisibles se repartirán de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Delta h_e &= \frac{1}{2} \Delta h_s \\ \Delta h_m &= \frac{1}{2} \Delta h_s \end{aligned}$$

Donde:

Δh_m = Pérdida de carga permisible en la múltiple

Δh_l = Pérdida de carga permisible en la lateral

De tal forma que, para mantener el CU de diseño, la carga de presión en toda la subunidad de riego deberá variar entre los valores de h_n y (h_n + Δh_s); incluyendo, en ambas líneas, las diferencias de presión causadas tanto por las pérdidas de carga por fricción como por las diferencias en elevación. Si el valor de Δh_s calculado resultara demasiado pequeño para propósitos del diseño económico, la opción es cambiar el gotero, seleccionando otro que tenga menor valor de v, de x, o de ambos; utilizar un mayor número de emisores por planta para incrementar e; reordenar el sistema a fin de obtener un valor mayor de h_a; o, por último, disminuir el valor de CU preestablecido.

Ejemplo: Determinar la pérdida de carga permisible en base a los siguientes datos:

$$\begin{aligned} CU &= 90\% \\ q_a &= 4 \text{ l/hr} \\ e &= 4 \\ v &= 0.04 \end{aligned}$$

Ecuación del emisor:

$$q = 1.38 h^{0.45}$$

$$q_n = \frac{90 \times 40}{\left(1 - \frac{1.27 \times 0.04}{\sqrt{4}} \right) 100} = 3.69 \text{ l/hr}$$

$$h_n = \left(\frac{q_n}{K} \right)^{1/x} = \left(\frac{3.69}{K} \right)^{1/0.45} = 8.90 \text{ m}$$

$$Kc \quad 1.38$$

$$ha = \left(\frac{4.0}{1.38} \right)^{1/0.45} = 10.64 \text{ m}$$

$$\Delta hs = 2.5 (10.64 - 8.90)$$

$$\Delta hs = 4.35 \text{ m}$$

$$\Delta hs = \frac{4.35}{2} = \Delta hs = 2.18 \text{ m}$$

Fórmulas para lateral sobre pendiente

De acuerdo a las recomendaciones de Keller y Karmeli, los caudales máximos y mínimos para líneas laterales que funcionen sobre pendientes hacia arriba y hacia abajo, pueden ser calculadas mediante el siguiente procedimiento.

Cuando el valor absoluto de ΔEl es menor de $\frac{1}{4}$ de ΔHl , se usan las ecuaciones:

$$\frac{q_n}{q_a} = 100 - (0.22 \times \frac{\Delta Hl}{Ha}) \quad (34)$$

La relación de máxima descarga puede ser aproximada por:

$$\frac{q_x}{q_a} = 100 - (0.58 \times \frac{\Delta Hl}{Ha}) \quad (35)$$

Donde:

- q_a : Caudal promedio de los emisores (l/hr)
- q_x : Caudal máximo del emisor calculado en base a la presión máxima mediante la ecuación característica ($q = Kh^x$) (l/hr)
- q_n : Caudal mínimo calculado en base a la presión mínima y a la ecuación característica del emisor
- ΔHl : Pérdida de carga permisible en la lateral
- Ha : Presión promedio en la lateral
- ΔEl : Diferencia de altura entre el principio y el final de la línea lateral.

Donde el valor entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de ΔHl , se usan las siguientes ecuaciones para computar q_n/q_a y q_x/q_n :

$$\frac{q_n}{q_a} = 1.00 - 0.38 \left(\frac{\Delta Hl \pm \Delta El}{Ha} \right) \quad (36)$$

y

$$\frac{q_x}{q_a} = 1.00 - 0.58 \left(\frac{\Delta Hl \pm \Delta El}{Ha} \right) \quad (37)$$

Donde el valor absoluto de ΔEl es mayor de $\frac{1}{2}$ de ΔHl se utilizan las siguientes ecuaciones para computar q_n/q_a y q_x/q_n :

$$\frac{q_x}{q_a} = 1.00 - 0.38 \left(\frac{\Delta Hl \pm \Delta El}{Ha} \right) \text{ Hacia arriba} \quad (38)$$

$$\frac{q_x}{q_a} = 1.00 - 0.38 \left(\frac{0.77 \Delta Hl \pm 0.4 \Delta El}{Ha} \right) \text{ Hacia abajo} \quad (39)$$

$$\frac{q_n}{q_a} = 1.00 - 0.58 \left(\frac{\Delta Hl \pm \Delta El}{Ha} \right) \text{ Hacia arriba} \quad (40)$$

$$\frac{q_n}{q_a} = 1.00 - 0.58 \left(\frac{0.77 \Delta Hl \pm 0.4 \Delta El}{Ha} \right) \text{ Hacia abajo} \quad (41)$$

Caudal total del sistema

$$Q_s = K \frac{A}{N} \frac{e q_a}{Sp Sn} \quad (42)$$

$$Q_s = K \frac{A}{N} \frac{q_a}{Sp SI} \quad (43)$$

Donde:

- Q_s : Caudal total del sistema (l/seg)
- A : Área total del campo (Has)
- N : Número de subunidades de riego que operarán simultáneamente.
- K : Constante de proporcionalidad que depende de las unidades

Diseño hidráulico de las líneas laterales

Una vez definidas las pérdidas de carga permisibles en la lateral y en la múltiple o terciario, el próximo paso es el diseño hidráulico de la línea lateral.

Las tuberías laterales son diseñadas en polietileno de baja densidad (PELD), en los diámetros de 12, 16 ó 20 mm. Este material es más flexible y se adapta mejor a las condiciones de manipuleo y tipo de conexión de encaje – púa de los goteros.

El diseño hidráulico de la red de distribución tiene como objetivo el cálculo de los caudales y presiones al principio de la subunidad de riego. Luego se definen los diámetros y longitudes en concordancia con las pérdidas de carga permisibles. Hechos los cálculos hidráulicos de la subunidad, los cálculos de las tuberías secundarias y principales (ubicadas aguas arriba de los reguladores de presión), se realizan siguiendo la misma metodología utilizada en otros métodos de riego. La secuencia es la siguiente: Laterales, múltiples, secundaria y principal; por último se diseña el cabezal de control.

La disposición u orientación del sistema está influenciada primordialmente por las pendientes del terreno. Las líneas laterales deben disponerse en el sentido paralelo a las curvas de nivel y las múltiples en el sentido perpendicular a ellas.

Cuando la pendiente de las laterales es cero, éstas pueden quedar a un sol lado de la múltiple, si se trata de laterales dobles, se recomienda que tengan la misma longitud a ambos lados de la múltiple.

Cuando la lateral corre sobre terrenos con pendientes, los pares de laterales, que se alimentan de la múltiple, deberán tener longitudes diferentes para, de esta manera, lograr diferencias de presiones similares (fricción y elevación). El lateral más corto irá hacia arriba y el lateral más largo hacia abajo.

Efecto de las conexiones emisor-lateral

La conexión de un emisor a la tubería lateral ocasiona una pérdida de carga cuyo valor depende de las características de la conexión y del diámetro del lateral. A efecto de calcular, las conexiones se pueden sustituir por una longitud equivalente de tubería, a la que se representa por f . La pérdida de carga unitaria incluido el efecto de las conexiones (J') se obtiene modificando la que se produciría de no haber conexiones (J) según:

$$J' = J \frac{S_e + f_e}{S_e} \quad (44)$$

S_e

Donde:

Se: Separación entre emisores (m)

f_e : Longitud equivalente de la conexión (m)

El valor de f_e depende del tipo de conexión:

Conexión sobre línea. Se pueden aplicar las fórmulas deducidas por Montalvo (1983), y citadas por Pizarro, 1990.

Tipo de conexión

$$\text{Grande} \quad f_e = 23.04 \cdot d_i^{-1.84} \quad (45)$$

$$\text{Estándar} \quad f_e = 23.04 \cdot d_i^{-1.84} \quad (46)$$

$$\text{Pequeña} \quad f_e = 23.04 \cdot d_i^{-1.84} \quad (47)$$

En el ábaco de la figura 4 se muestran los parámetros de diámetro cada tipo de conexión y los valores de f_e .

Conexión interlínea. En este caso f_e es independiente del diámetro y vale $f_e = 0.23$ m.

Microtubos. (Ver también figura 5)

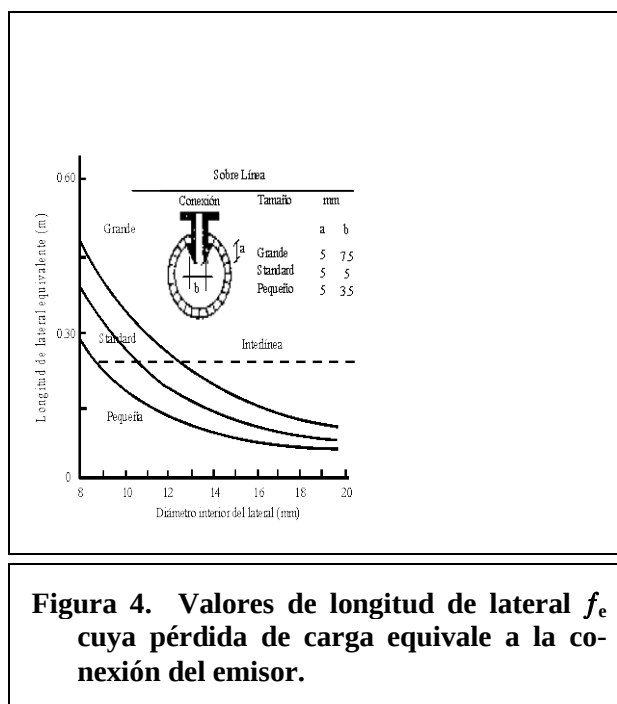


Figura 4. Valores de longitud de lateral f_e cuya pérdida de carga equivale a la conexión del emisor.

	f_e (m) para un diámetro de lateral de:	
Longitud insertada (cm)	16 mm	20 mm
1	0.17	0.06
10	0.20	0.06
20	0.25	0.10
30	0.31	0.13

Ejemplo 6.

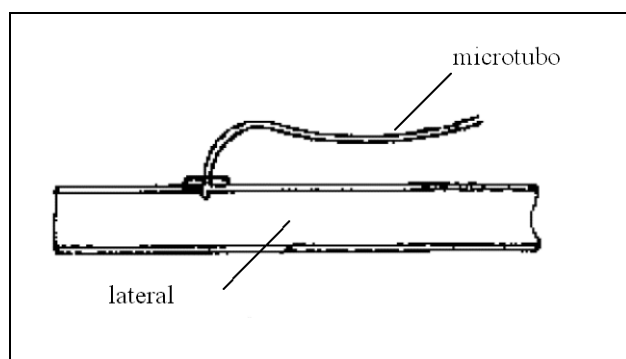


Figura 5. Microtubo

En un ejemplo anterior se ha calculado que con $d = 10.3$ mm y $q = 72$ l/h, el valor de $J = 0.01301$ m/m. Calcular J' si en la tubería se colocan goteros con una separación $S_e = 2$ m y con conexiones tipo estándar.

Aplicando (41) para $d = 10.3$ mm se obtiene $f_e = 0.24$ m. Aplicando (39):

$$J' = 0.01301 \frac{2 + 0.24}{2} = 0.01457$$

Al instalar los goteros el caudal inicial de 72 l/h irá disminuyendo a lo largo de la tubería, por lo que la pérdida de carga también lo hará. Por ahora sólo se ha tenido en cuenta cómo las conexiones aumentan el valor de J .

Determinación experimental de la longitud equivalente de una conexión

El valor de f_e de un determinado emisor se puede medir mediante un experimento muy sencillo. Se hace pasar un caudal q por una tubería de longitud I , sin emisores, y se mide la pérdida de carga H_1 . A continuación se conectan los emisores y se obturan para que no salga agua. Se hace pasar el mismo caudal q y se mide la nueva pérdida de carga H_2 . La diferencia ($H_2 - H_1$), dividida por el número de

emisores, es la pérdida de carga provocada por cada emisor, que conociendo $J (=H/I)$, se transforma fácilmente en longitud equivalente.

Ejemplo 7.

$$\begin{aligned} I &= 30 \text{ m} \\ q &= 72 \text{ l/h} \\ H_1 &= 0.41 \text{ m} \end{aligned}$$

Se instalan 14 emisores; $H_2 = 0.46$ m

$$\frac{H_2 - H_1}{14} = 0.00357$$

$$J_1 = \frac{H_1}{I} = \frac{0.41}{30} = 0.01367 \quad f_e = \frac{0.00357}{0.01367} = 0.26 \text{ m}$$

Efecto de la disminución progresiva del caudal

En los laterales de riego el caudal va disminuyendo a lo largo de la tubería a medida que los emisores van extrayendo agua. En consecuencia, la pérdida de carga unitaria (J) es asimismo decreciente, de manera que si la pérdida total se calculase según $H = J \times I$, siendo J el valor correspondiente al caudal de entrada en la tubería, el valor obtenido de H sería superior al real. Este hecho se tiene en cuenta introduciendo el coeficiente F de Christiansen, que es menor que la unidad:

$$H = F \times J \times I \quad (48)$$

El coeficiente F es función en n (número de emisores) y del régimen hidráulico o, lo que es lo mismo, del exponente de la velocidad β de la fórmula para pérdida de carga. En el caso de derivaciones discretas, es decir, de emisores puntuales espaciados una cierta distancia (S_0), el valor de F viene dado por la fórmula de Christiansen, cuya deducción se encuentra en los manuales de hidráulica de riego:

$$F = \frac{1}{1 + \beta} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{\beta}-1}{6n^2} \quad (49)$$

Válida para el caso de que el primer emisor esté del comienzo de la tubería a una distancia 1_0 igual a S_0 . En riego localizado, normalmente $\beta = 1.75$.

Algunos elementos de riego, como las tuberías de exudación, producen una distribución continua del

agua. En ese caso el coeficiente de Christiansen vale:

$$F = \frac{1}{\beta + 1} \quad (50)$$

Que equivale a (44) cuando $n \rightarrow \infty$. Cuando el régimen es laminar, situación frecuente en exudación $\beta = 1$ y $F = 0.5$.

Pérdida de carga en un lateral

En los laterales portagoteros coinciden el efecto de mayor pérdida por las conexiones y el de disminución progresiva del caudal. La pérdida de carga resultante se calcula según:

$$\Delta H = J^1 \times F \times I \quad (51)$$

$$J_1 = J \frac{S_0 + f_0}{S_0} \quad (52)$$

Ejemplo 8.

Calcular la pérdida de carga en un lateral con estos datos, continuación de los ejemplos anteriores.

$d = 10.3$ m
 $I = 36$ m
 $n = 18$ goteros
 $S_0 = 2$ m
 $I_0 = S_e$
 q (caudal por gotero) = 4 l/h

En los ejemplos anteriores se ha calculado $J = 0.01301$ m/m

$$J^1 = 0.01301 \frac{2 + 0.24}{2} = 0.01457 \text{ m/m}$$

En la tabla 1 del capítulo 15, para $\beta = 1.75$, $I_0 = S_0$ y $n = 18$ se obtiene $F = 0.392$.

$$\Delta H = 0.01457 \times 0.392 \times 36 = 0.21 \text{ m}$$

Disposición de la tubería lateral

A continuación se presenta una explicación de los procedimientos que se deben seguir en el diseño de la tubería lateral, tales como el caudal y la presión de entrada, la localización sobre la tubería múlti-

ple, la longitud y la diferencia de presión en la línea.

Cuando la pendiente (S) del terreno sobre la lateral es menor de 3%, resultará más económico colocar laterales a ambos lados de la tubería múltiple. La múltiple debe ser proporcionada de tal forma que, comenzando de una conexión común a la múltiple, la presión mínima en el par de laterales (uno a cada lado de la múltiple), sea la misma. Así en terrenos planos, el par de laterales deberá tener la misma longitud que el espaciamiento entre las múltiples será:

$$S_m = 2 I = L \quad (53)$$

Donde:

S_m . Espaciamiento entre múltiples
 I : Longitud de las laterales
 L : Longitud de las laterales dobles

Cuando existe una pendiente en la dirección del lateral (y de las hileras), la línea múltiple deberá correrse hacia arriba del punto central, de manera que las laterales hacia arriba queden más cortas que aquellas hacia abajo con el objeto de que, la combinación de las diferencias de altura y las pérdidas de carga por fricción, queden balanceadas.

El espaciamiento entre las múltiples, S_m , resulta del efecto combinado entre la geometría del terreno y la hidráulica de la lateral. Para fines prácticos es aconsejable limitar las diferencias de presión en la lateral Δh , a la mitad de la pérdidas de carga permisibles en la subunidad ($\Delta h = \frac{1}{2} \Delta H_s$). La conformación de la subunidad será el resultado de la tubería múltiple con sus laterales acoplados.

Se considera que el espaciamiento entre múltiples, S_m . Debe ser el mismo para terrenos planos, que para aquellos con pendientes en las laterales de 2% ó menores. Este hecho permite establecer el dimensionamiento de la múltiple entre las laterales.

Longitud de la lateral

Cuando dos laterales se extienden en dirección opuesta, a partir de un mismo punto de ingreso a la múltiple, se denomina laterales apareados. La longitud de los pares de laterales L , es igual al espaciamiento entre múltiples, S_m . La longitud de un lateral sencillo se designa como I .

Presión inicial en la lateral

Para una línea lateral que corre sobre un terreno plano, con diámetro uniforme, la presión inicial es:

$$H_l = h_a + \frac{3}{4} H_f + \Delta E/2 \quad (54)$$

y la presión final es.

$$h_f = h_a - (1/4 H_f + \Delta E/2) \quad (55)$$

o también

$$h_c = h_l - (H_f - \Delta E) \quad (56)$$

En la cual:

- hl: Carga de presión a la entrada de la lateral (m)
 hc: Carga de presión al final de la lateral (m)
 hf: Pérdida de carga hidráulica por fricción en la lateral (m)
 ΔE: Cambio en elevación (-) lateral hacia abajo; (+) lateral hacia arriba.

Laterales con diámetros múltiples

Los laterales con varios diámetros no se usan en riego localizado debido a que son poco prácticos, tanto para instalarlos, como para mantenerlos. Solamente se justifican bajo pendientes excesivas con la de comparar las diferencias de nivel con pérdidas de carga hidráulica.

Diseño de la múltiple

La línea múltiple es también una tubería con múltiples salidas equiespaciadas, la cual supe de agua a las líneas laterales. La múltiple conjuntamente con las laterales conforman la unidad de riego. A los fines de disposición de la unidad de riego, se toman en consideración principalmente las pendientes del terreno. Las múltiples se colocan en el sentido de las máximas pendientes, dejando para los laterales el sentido de las pendientes menores. El diseño de la múltiple se realiza de forma similar a las laterales, con la diferencia que los caudales son mayores y el espaciamiento entre salidas es más amplio.

El regulador de presión se coloca generalmente en la entrada de la múltiple, lo cual asegura que todas las subunidades de riego tendrán la misma presión de entrada. La longitud de la lateral determinada por el número de laterales que sirve y la distancia

entre laterales. En la selección del número de laterales que sirve intervienen los siguientes factores:

- Mantener el caudal dentro de las diferencias de presión permisibles.
- Compromisos económicos entre el diámetro de la lateral y de la múltiple.
- Manejo del método de riego. Grado de automatización.

Posicionamiento con respecto a la secundaria. En terrenos con pendientes, el punto de alimentación del múltiple, debe hacerse de una forma estratégica cuando esto funciona sobre terreno plano, la alimentación se realiza por el punto medio. En terrenos con pendiente (figura 6) debe colocarse la alimentación corrida hacia arriba. El procedimiento para esta ubicación es similar a aquel seguido para la ubicación de la múltiple en las laterales con pendiente.

El mejor punto de entrada a fin de minimizar las diferencias de presión puede ser determinado seleccionando las longitudes y los diámetros de los lados hacia arriba y hacia abajo de la múltiple, de tal manera que las presiones al final de ambos lados, se la misma.

Además la diferencia en las cargas de presión debe ser:

$$\Delta h_m \geq H_m - H_1$$

$$\Delta h_m \geq H_m - H_2$$

Donde:

- ΔH_m: Diferencia de carga permisible en la múltiple (m)
 H₁ y H₂: Cargas de presión al final de la múltiple hacia arriba y hacia abajo, respectivamente (m)
 H_m: Presión a la entrada de la múltiple

Si las presiones al final de ambos lados de la múltiple son iguales, entonces:

$$\Delta H_1 + Z_1 = \Delta H_2 + Z_2 \quad (57)$$

Donde:

- ΔH₁ y ΔH₂: Son las pérdidas de carga por fricción en los lados hacia arriba y hacia abajo; respectivamente (m)
 Z₁ y Z₂: Son las alturas al final del lado de arriba y de abajo, respectivamente

La resolución de la ecuación anterior se puede realizar mediante un proceso interactivo, siguiendo los siguientes pasos:

- Siempre Z_1 y Z_2 debe ser menor que la diferencia de carga permisible ΔH_m .
- Se asume que el lado hacia arriba siempre será menor que el lado hacia abajo.
- Se determinan las longitudes y los caudales de cada lado.
- Se seleccionan los diámetros de ambos lados de tal forma que:

$$\Delta H_1 \leq \Delta H_m Z_m - Z_1 \quad (58)$$

$$\Delta H_2 \leq \Delta H_m Z_m - Z_2 \quad (59)$$

Se repite el proceso hasta lograr una solución económica que satisfaga las anteriores ecuaciones.

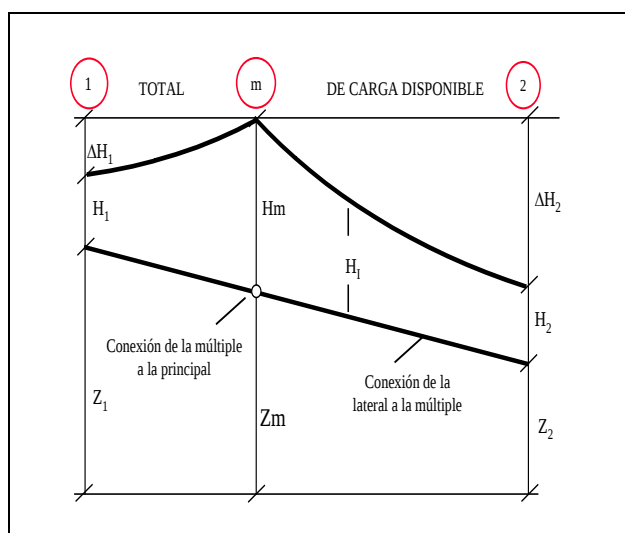


Figura 6. Carga de entrada a la lateral sobre una múltiple con pendientes.

Diseño de línea principal

La función de la tubería principal es la de llevar el agua hasta los reguladores de presión en cada subunidad de riego. Las pérdidas por fricción que causan la baja de presión es de fundamental consideración en cualquier diseño de tuberías; dos principios básicos están incluidos:

- Cuando el bombeo es incluido, la selección del diámetro de las tuberías es gobernado por el balance racional entre el costo de bombeo y el capital invertido para la adquisición de la tubería.
- Cuando la presión gravitacional es utilizada, el problema es conservar la presión disponible a

fin de evitar utilización de bombas y reducir los costos al mínimo.

Criterios para la selección del diámetro de la línea principal

Método de la pérdida de carga unitaria

Consiste en seleccionar los diámetros de las tuberías de manera que las pérdidas no excedan a 1 psi/100' de tubería (2.3 m/100m).

Método de la velocidad permisible

En este método se establece una velocidad límite máxima en la tubería principal. Los valores comunes a usar son entre 5 y 10 pies/seg.; siendo el valor usual 7 pies/seg. (2.13 m/seg)

Por continuidad:

$$Q = V * A \quad (a) \quad (60)$$

V es la velocidad del fluido

A es el área de sección transversal de la tubería pero:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (b)$$

donde D es el diámetro interno de la tubería.

Despejando "A" en (a):

$$A = \frac{Q}{V} \quad \text{sustituyendo (b) en (a):}$$

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{Q}{V}$$

Despejando "D"

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi V}} \quad (61)$$

Método de porcentaje

Se seleccionan los diámetros de la tubería principal de tal manera que las pérdidas de carga no sobrepasen el 10% a 20% de la presión media de operación en la subunidad de riego.

Asumiendo $H_f(p) = 15 \% P_m$,

$$H_f(p)_p = 0.15 * P_m \quad (62)$$

Donde:

$H_f(p)_p$: Es la pérdida de carga permisible en la línea principal

P_m : Es la presión media de operación en la subunidad de riego económico

Método de comparación de costos

En este método se trata de seleccionar los diámetros en los cuales la suma de los costos fijos de la tubería y los costos de energía sean los mínimos.

Existirá entonces un punto mínimo de costos totales, el cual dará el diámetro más económico, como se muestra en la figura 7.

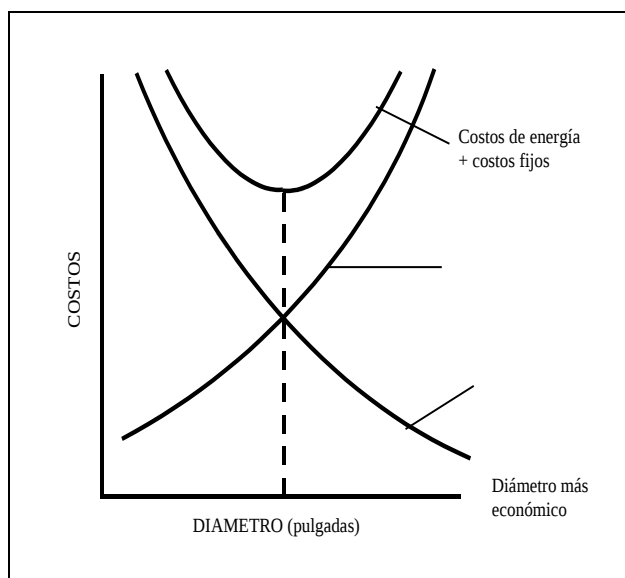


Figura 7. Relación de costos y diámetros de la tubería.

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA DEL SISTEMA

Requerimiento de carga dinámica total (CDT)

La carga dinámica total que requiere un sistema de riego localizado para su funcionamiento está constituido por los siguientes componentes:

1. Carga o presión de entrada a la subunidad de riego (H_m), la cual incluye la presión de traba-

jo del emisor y la pérdida de carga por fricción simple que ocurre en la múltiple en la lateral desde su inicio hasta el punto donde está ubicado el aspersor promedio. Este valor de pérdida de carga se estima en $\frac{1}{4}$ de $H_f(L)$.

2. Pérdidas por fricción simple en la tubería principal $H_f(LP)$
3. Pérdidas por fricción debidas a accesorios instalados en las baterías hm.
4. Pérdidas por fricción en la tubería de succión o aspiración de la bomba $H_f(s)$.
5. Altura de succión de la bomba " H_s ", que corresponde a la distancia vertical existente entre el nivel de agua en la fuente y el eje de la bomba.
6. Diferencia de elevación " H_e " entre el eje de la bomba y el punto de salida de la tubería principal, donde ocurre la máxima pérdida de carga.
7. Carga cinética o de velocidad ($V_2/2g$) que generalmente se desprecia por sus reducidos valores.

De acuerdo con lo expuesto, la carga dinámica total (CDT) requerida para el funcionamiento de un sistema de riego por aspersión será igual a:

$$CDT = H_m + H_f(LP) + H_f(a) + h_m + H_f(s) + H_s + H_e \quad (63)$$

Donde todos los componentes se expresan en metros de carga o altura de agua.

Potencia de la bomba y el motor

Para el funcionamiento de un sistema de riego por aspersión se requiere efectuar el trabajo de mover un caudal " Q_t " contra una carga total "CDT", para lo cual es necesario disponer de una potencia neta de:

$$P_n = A_t * \delta * CDT \quad (64)$$

Donde:

- P_n : Es la potencia neta requerida en Kg * m/seg.
- Q_t : Es el caudal total de la tubería principal en m³/seg.

δ : Es el peso específico del agua en Kg/m³
 CDT: Es la carga total en m

Si la expresión anterior se divide entre 75, Pn resultará expresada en caballos de vapor (Hp):

$$Pn(Hp) = \frac{Qt(m^3/s) * \delta C(Kg/m^3) CDT(m)}{75} \quad (65)$$

Suponiendo que $\delta = 1000 \text{ Kg/m}^3$, la ecuación anterior se puede transformar en:

$$Pn(Hp) = \frac{Qt(L/s) * CDT(m)}{75} \quad (66)$$

Este valor representa la potencia neta necesaria para el funcionamiento del sistema. Sin embargo, él constituye solo una guía, ya que para la selección de las bombas es necesario consultar las “curvas características” de las mismas. Ellas deben ser proporcionadas por los fabricantes de estos dispositivos, y se debe escoger, entre una serie de modelos, la bomba que mejor se adapte a las condiciones de Qt y CDT deseadas.

En las curvas características se relacionan los factores caudal “Q”, carga “H”, potencial “P” y eficiencia “Eb”, tal como puede observarse en la figura 5, que representa las curvas características de una marca y modelo determinado de bomba.

Por medio de curvas de este tipo se selecciona la bomba que suministre el caudal deseado AT con la carga CDT requerida, en las condiciones de mejor eficiencia “Eb”.

De acuerdo con esto, la potencia bruta de la bomba “Pb” podrá calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$Pb(Hp) = \frac{Pn(Hp)}{Eb(\%)} * 100 \quad (67)$$

Las bombas más comúnmente empleadas en riego por aspersión, son las centrífugas de eje horizontal y las de turbinas para pozos profundos. La elección de uno u otro tipo de bomba dependerá, fundamentalmente, de las condiciones de bombeo. En general, se seleccionan bombas centrífugas cuando el agua se obtiene a profundidades menores de 6 m y bombas de turbina vertical en caso de profundidades mayores.

III. INSTALCION DE LOS SISTEMAS DE FERTIRRIEGO

INTRODUCCION

Las soluciones concentradas de fertilizantes pueden ser inyectadas a un sistema de riego mediante la selección de un equipo apropiado en una amplia gama disponible en el mercado, tales equipos pueden ser: Bombas de inyección, válvulas, controles de tiempo, computadoras, fuentes de potencia, tanques presurizados, venturis, medidores de caudal y válvulas de aspiración.

La mayoría de los sistemas de inyección han sido diseñados para manejar otros productor químicos además de los fertilizantes, tales como: herbicidas, nematocidas, insecticidas, alguicidas, cloro y ácidos. La selección del equipo debe basarse en las características del sistema de irrigación utilizado. La otra consideración depende del tipo de fertilizante que va a ser aplicado. La mayoría de los fertilizantes son altamente corrosivos sobre los componentes metálicos de bombas, conexiones, válvulas y filtros. La meta debe ser concebida con miras a un sistema de inyección tan sencillo como

sea posible. La tabla 1, muestra la severidad de los daños causados por la corrosión de diferentes fertilizantes sobre los materiales metálicos de fabricación más comunes.

Sustancias ácidas no deben ser añadidas en líneas de cemento o de asbersto-cemento. Las líneas de plástico pueden ser dañadas cuando las sustancias añadidas al sistema contienen solventes que puedan interactuar con los plásticos (sobre todo PVC) debilitando las paredes de los tubos, pudiendo ocasionar reventones. Por otro lado, las soluciones concentradas de fertilizantes deben ser almacenadas en tanques de plástico inerte como Polietileno o Polipropileno; los tanques metálicos pueden corroerse generando partículas contaminantes.

Es muy importante que todo sistema esté provisto de dos puntos de inyección, uno antes y otro después del filtro. El punto después del filtro se usa cuando la filtración no es requerida, evitando de esta forma, causar daños por corrosión sobre las válvulas y filtros de malla metálica. Además la

línea de descarga del tanque de fertilización debe tener un filtro y, así mismo, la manguera de inyección debe estar equipada con un filtro de línea pequeño ($1/2''$ o $3/4''$).

La capacidad o caudal del sistema de inyección va a depender de factores tales como, la concentración de la solución madre, la tasa y la frecuencia de aplicación. Naturalmente, mientras la solución sea más concentrada y las aplicaciones más frecuentes, se requerirán unidades de inyección más pequeñas y por lo tanto más baratas.

Las tasas y frecuencias de aplicación de agua varían considerablemente dependiendo del cultivo, espaciamento entre emisores, caudal de los emisores, etc. Plantaciones hortícolas, frutales y viñedos pueden tener un tiempo de riego de moderado a relativamente alto, esto permite que el sistema de inyección se arranque a funcionar con cierto tiempo posterior al arranque del riego y, así mismo, podrá cerrarse antes de que finalice el riego, de esta forma, se logra, por un lado que se presurice el sistema y se estabilice la aplicación y, por el otro, el lavado del sistema luego de una inyección, lo cual es imprescindible, no solamente para reducir el riego de corrosión, sino también para reducir el crecimiento de la población microbiana dentro del sistema. Para plantas cultivadas en viveros o en macetas, la tasa de aplicación real de agua es generalmente muy alta; por lo tanto, el tiempo de riego es tan estrecho que no hay tiempo disponible para el llenado del sistema ni para el lavado. Por ejemplo, con un emisor de 4 l/hr en un envase de 0.3 m de diámetro, la tasa de aplicación de agua de aproximadamente 50 mm/hr y, si el envase fuera de 0.15 m de diámetro, la tasa de aplicación sería de 200 mm/hr. El riego de plantas en macetas, el agua aplicada debe contener la cantidad necesaria de nutrimentos; sin embargo, es posible que el

volumen de agua necesario sea tal que no pueda ser contenido en el casco volumen de los envases.

MÉTODOS DE INYECCION

La incorporación de las sustancias fertilizantes a la red puede efectuarse mediante distintos tipos de equipos. Estos presentan características constructivas y de funcionamiento que pueden hacerla más o menos adecuada de acuerdo a los siguientes aspectos:

- El tamaño de la unidad de riego.
- Grado de automatización que se pretende.
- Grado de eficiencia de distribución tolerable.
- Nivel de inversión económica permitida.

Se deben considerar ciertos factores cuando se va a utilizar un sistema de inyección para la fertilización, estos factores son:

1. Método y dosis de aplicación.
2. Concentración de la solución madre de fertilizantes.
3. Precisión de la dilución.
4. Prevención de la contaminación de la fuente de suministro de agua.

Los métodos principales para la inyección de fertilizantes o productos químicos en el sistema de riego se agrupan en dos tipos: en primer lugar, aquellos que utilizan la energía hidráulica proveniente del mismo sistema de riego como fuente de energía para su propulsión; en segundo, los utiliza una fuente de energía externa, tal como energía mecánica proveniente de un motor eléctrico o de combustión interna. Ambos grupos poseen ventajas y desventajas pero su aplicación es particular de acuerdo a la fuente de energía disponible y a las diferentes situaciones que se presentan.

Tabla 1. Severidad de daños por corrosión de diferentes fertilizantes sobre los metales mas comunes.

Tipo de Metal	Nitrato de Calcio	Nitrato de Amonio	Sulfato de Amonio	Urea	Acido fosfórico	Fosfato Diamónico	Formula completa 17-17-10(*)
Hierro galvanizado	2	4	3	1	4	1	2
Aluminio Laminado	0	1	1	0	2	2	1
Acero Inoxidable	0	0	0	0	1	0	0
Latón Amarillo	1	3	2	0	2	4	4
Clave: 0, ninguna; 1, baja; 2, moderada; 3, considerable; 4, severa (inmersión durante 4 días)							
* Lámina metálica sumergidas en solución de fertilizantes durante 4 días							
* La solución elaborada disolviendo 5 kg de materia en 400 lts. de agua							
(*) Mezcla comercial elaborada con sulfato de amonio, fósforo diamónico y sulfato de potasio.							

MÉTODOS QUE UTILIZAN LA MISMA ENERGÍA HIDRAULICA DEL SISTEMA DE RIEGO

Estos métodos tienen una ventaja muy importante que es la de no requerir de una fuente de energía externa adicional y, por lo tanto, puede ser instalados en cualquier punto del sistema donde existe una energía hidráulica suficiente para cumplir la operación. Estos métodos de inyección se pueden clasificar a su vez en:

Mediante la succión de la bomba
Mediante presión diferencial
Venturi
Bombas de inyección de propulsión hidráulica

Cada uno de estos métodos tienen ventajas y desventajas que los definen y que los hacen adaptarse mejor a determinadas situaciones y los descalifican para otras. A continuación se hará una descripción de cada método.

Mediante la succión de la bomba

La presión negativa que genera en la tubería de succión de la bomba principal del sistema de riego es un recurso que puede utilizarse para inyectar soluciones de agroquímicos en el sistema. Sin embargo, cuando la fuente de agua posee una carga positiva de 1 bar o más, la presión negativa en la succión no se genera, por lo cual el método no es aplicable.

Ventajas

Entre las ventajas del método se cuentan las siguientes:

- Disponible en cualquier sistema de riego donde se realice bombeo
- Gran sencillez
- Tanques para la solución concentrada abiertos a la presión atmosférica, por lo tanto son más económicos y se pueden constituir de grandes volúmenes
- Permite lograr altos caudales de inyección

Desventajas

- La inyección se realiza previo al bombeo, lo cual causa daño por corrosión de la bomba
- Poca precisión en la tasa de inyección, debido a que ésta varía con las variaciones de presión en el sistema

- Incrementa los riegos de contaminación de la fuente de agua

Existen soluciones muy sencillas que funcionan satisfactoriamente. El caso de muestra en la figura 1.

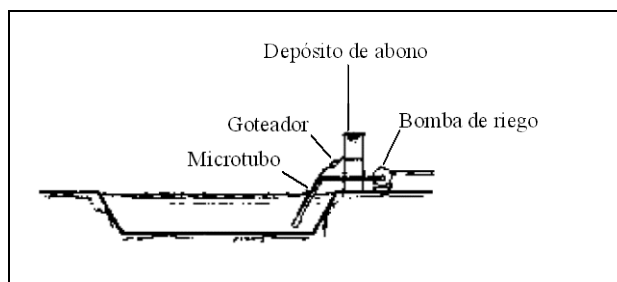


Figura 1. Aplicación de abono a través de la succión de la bomba.

Del depósito de abono parte un microtubo que termina junto a la válvula de aspersión de la bomba de riego. Un goteador del tipo de los utilizados en medicina para suero puede ser utilizado para regular el caudal de abono. El gotero se abre manualmente cuando la bomba está regando, o bien se intercala en el microtubo una válvula solenoide que se abre sólo cuando la bomba de riego funciona, o con un temporizador para alcanzar un determinado retraso respecto a su arranque. En el depósito se coloca la cantidad de abono a añadir de cada riego, y su aplicación se regula de forma que el depósito se vacíe aproximadamente en el tiempo deseado, antes de terminar el riego. El microtubo no se puede conectar a la tubería de aspiración porque al vaciar el depósito, la bomba aspiraría aire, a menos que se instale algún sistema de cierre que lo impida. El método así descrito, ocasiona alto riesgo de contaminación de la fuente.

Unidades de presión diferencial (PD)

Otro método práctico de inyección consiste en los sistemas que utilizan una presión diferencial PD, los cuales utilizan las diferencias de carga que se pueden generar o que existen ya en el sistema de riego, como medio para inyectar agroquímicos. Diferencias de carga hidráulicas pueden desarrollarse mediante válvulas, mediante un sistema Venturi, en los codos y otras conexiones, o simplemente mediante fricción en las mismas tuberías. La mayoría de los sistemas PD utilizan tanques cerrados, presurizados, que sean capaces de soportar la misma presión del sistema de riego.

La principal ventaja de los sistemas PD es su sencillez y la ausencia de partes móviles. Ellos pue-

den operar en cualquier parte donde halla un caudal de agua y donde exista una caída de presión. Su principal desventaja es que la concentración de la solución en el tanque presurizado no es constante y cambia continuamente en forma logarítmica con el tiempo, a consecuencia del ingreso y egreso simultáneo de agua; de esta forma no es posible mantener una concentración constante de nutrientes en la inyección. Este sistema es difícil de operar cuando deba utilizarse para regar varias unidades de riego de forma secuencial, una después de la otra. Consecuentemente, cuando un tanque de fertilizante debe suplir varias unidades de riego, al terminar una unidad será necesario remover la solución residual para volverlo a rellenar con solución concentrada y regar la siguiente unidad de riego. Cuando se proyecta una instalación con riego secuencial; no es recomendable utilizar tanques presurizados PD para la inyección del fertilizante, debido a que estos producen una tasa de inyección variable en la dosis a aplicara a cada unidad de riego, por esto se recomienda utilizar en su lugar bombas inyectoras.

Descripción de los PD

Un tanque presurizado PD (figura 2) consiste en un depósito conectado en paralelo a la red de riego. El depósito, herméticamente cerrado, debe ser capaz de resistir la presión de la red. Se fabrican en plástico reforzado o metálicos y con volúmenes entre 20 y 200 litros. En el interior del tanque se coloca el abono, generalmente en forma de solución concentrada.

El depósito consta de dos tomas, una de entrada y otra de salida conectadas a al red de riego en dos puntos próximos, pero separados por una válvula, cuyo objetivo es crear una diferencia de presión del orden de 1-5m, para que parte del agua de riego circule por el circuito paralelo en el cual se encuentra el tanque.

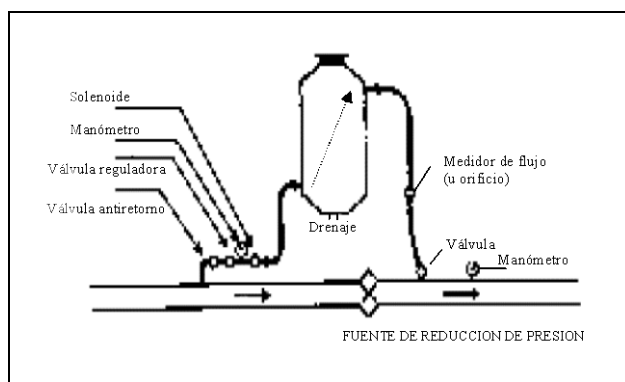


Figura 2. Tanque presurizado (PD).

La toma de entrada inyecta agua en la parte inferior del tanque, preferiblemente de forma tangencial a la pared, para que se mezcle bien con el abono. La toma de salida, situada en la parte superior, recoge una mezcla de agua de riego y de abono conduciéndola luego a la red de riego. Es conveniente que los tanques dispongan de una válvula de vaciado en la parte inferior y de un purgador, que debe estar situado en la tubería de salida. Asimismo es recomendable la instalación de un medidor de caudal.

Los tanques presurizados son muy populares, tal vez son los dispositivos de fertirrigación más ampliamente utilizados. Ello se debe a su sencillez, bajo costo y a que no necesitan energía extra para su funcionamiento, ya que aprovechan la energía del agua de riego, lo que permite su acoplamiento y colocación en cualquier punto de la red.

Tiene dos inconvenientes fundamentales:

1. Debido a que la concentración en abono del agua de riego no es constante con el tiempo de aplicación en cada riego, hay que reponer el abono del tanque en cada riego, lo que disminuye el grado de posible automatización de la fertirrigación.
2. Los tanques presurizados, debido a las presiones que deben soportar, requiere de mayor robustez, por lo tanto son más caros, y esto limita su volumen.

A pesar de estos inconvenientes, es un elemento muy útil siempre que se tenga ideas claras acerca de su funcionamiento. Por ello vale la pena profundizar en el estudio cuantitativo de este sistema de aplicación de abono, lo que se hace a continuación, para describir posteriormente algunos procedimientos que permiten aumentar la uniformidad de la concentración con respecto al tiempo.

Formulaciones para las unidades PD

La masa de mezcla que existe en un instante dado en el tanque va a depender de la solubilidad del fertilizantes, del tamaño y forma del tanque, de la gravedad específica del fertilizante, del caudal de agua a través del tanque y de la temperatura. Cuando se requiera conocer el porcentaje de material que permanece en el tanque o que ha sido descargado del mismo, la siguiente ecuación puede ser usada, asumiendo una mezcla perfecta dentro del tanque.

$$n = 100^{-xt/v} \quad t = - \frac{v}{x} \ln \frac{n}{100}$$

Donde:

- n: es el % de mezcla que permanece en el tanque
 x: Es el caudal que pasa a través del tanque
 t: Es el tiempo

La concentración en el tanque nunca llega a ser cero, el conocimiento de la tasa de dilución permite definir adecuadamente cuando drenar el tanque presurizado sin desperdiciar excesivo fertilizante.

En la figura 3, se muestran las curvas que se generan de la ecuación anterior para tres valores de porcentaje del volumen del tanque que circula a través del mismo por unidad de tiempo. Por ejemplo, si un tanque de 300 l tiene una caudal de 15 l/hr, la curva de 5% (15/300*100) debe usarse. Si se va a utilizar sólo la mitad del material (50%), la inyección deberá mantenerse durante 18 hrs. La curva también indica que se requerirán por lo menos 100 hr para que la concentración se reduzca a menos de 1%. Si por el mismo tanque de 300 l se hacen circular 15 l/min, se necesitarán 18 min, para que la concentración se reduzca a la mitad y 100 min, para que se reduzca a menos de 1%.

El caudal a través del tanque puede ser controlado

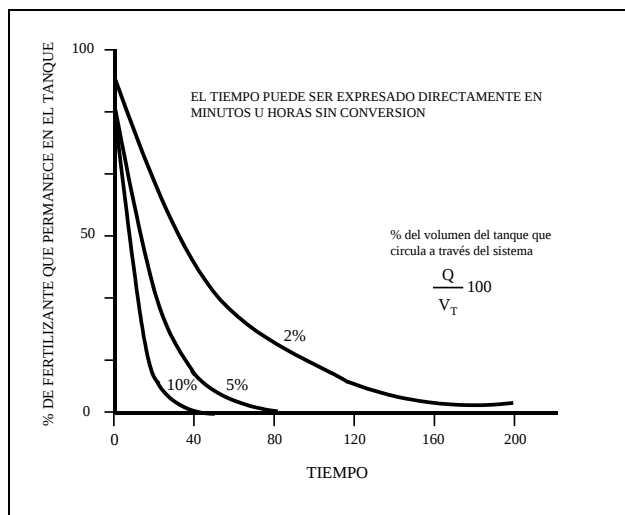


Figura 3. % de fertilizante, que permanece en el tanque PD, en función del tiempo.

por válvulas. Existen varios tipos de medidores de caudal que pueden utilizarse en caso de caudales altos; sin embargo, para caudales muy bajos es muy difícil obtener medidores; en este caso,

podrán usarse un método alternativo. Orificios circulares dentro de las mangueras de las líneas pueden dar una estimación del flujo. El procedimiento consiste en medir la diferencia de presión desarrollado a ambos lados del orificio.

El diámetro de orificio se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

Donde:

- D: Diámetro del orificio en mm
 Q: Caudal en l/min.
 C: Coeficiente del orificio (0.62)
 P: Diferencia de presión en Kpa. (1 Kpa = Cbar)

La inyección de fertilizante no debe comenzar hasta que todas las líneas se hallan llenado de agua y todos los emisores se encuentren funcionando. Con una regla práctica, es preferible comenzar la inyección una hora después de haber comenzado el riego y mantenerla hasta una hora antes de que finalice. Este tiempo permite, en la mayoría de los sistemas, primero llenarse completamente y un lavado del sistema al final de riego. En los sistemas pequeños, en lugar de una hora, 30 minutos a veces menos puede ser suficiente. Aplicar productos químicos a través de un sistema de riego parcialmente lleno, va a resultar en una uniformidad de distribución muy baja. Es necesario además permitir que el agua fluya por suficiente tiempo después de la inyección, para que el sistema se lave completamente y evitar así la corrosión y una excesiva proliferación de la población microbiana.

Una modificación del tanque de presión diferencial consiste en un tanque que contiene un saco de plástico flexible en su interior, dentro de ese saco es añadida la solución concentrada de fertilizante. El agua va a ocupar el espacio entre el saco y el tanque, forzando el fertilizante a salir desde el tanque hacia el sistema. El saco plástico debe ser reemplazado frecuentemente ya que puede romperse y causar inconvenientes.

Otra modificación consiste en reemplazar el saco plástico por un diafragma de goma. La solución concentrada es añadida a un lado del diafragma, el agua a más alta presión entrará por el otro lado del diafragma forzando a la solución a penetrar en el sistema. Estos dos últimos métodos tienen la ventaja que la solución concentrada no tiene contacto con el agua antes de la inyección y, por lo tanto, la concentración no varía logarítmicamente con el

tiempo, como es el caso de los tanques PD normales.

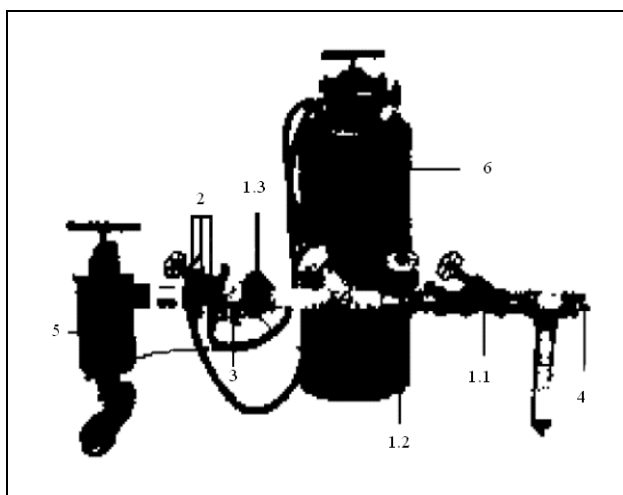


Figura 4. Montaje del PD en el cabezal de control (Plastro-Gvat). 1.1) Válvula principal. 1.2) Válvula volumétrica. 1.3) Válvula ant-retorno. 2) Válvula y conexiones para el PD. 3) Válvula de tres vías con manómetro diferencial. 4) Válvula de final de línea. 5) Filtro de Malla. 6) Tanque PD.

Inyector venturi

Un inyector venturi consiste fundamentalmente en un tubo por el que circula el agua, provisto de un estrechamiento en el cual, por el efecto venturi se produce una presión negativa.

En la zona de estrechamiento lleva conectada una tubería cuyo otro extremo se introduce en un depósito con la solución a inyectar, situada a la presión atmosférica. La depresión provoca la succión del líquido y su incorporación a la red. Se trata de un inyector barato y que no necesita energía.

En la figura 5 se muestra el esquema de la instalación de un inyector venturi. Se coloca en paralelo con la tubería de riego; en ésta una válvula produce una diferencia de presión, que dirige parte del agua al circuito del inyector. Dicha válvula se puede evitar aprovechando cualquiera de los elementos del cabezal que crean pérdidas de presión (reguladores, filtros, etc.).

En el circuito del inyector se instala otra válvula para regular el paso del agua y en consecuencia la cantidad de abono succionado. A diferencia del tanque de abonado, la concentración aplicada por el inyector venturi es constante. Sin embargo, la

cantidad de fertilizante inyectado no es proporcional al volumen de agua de riego, lo que supone un cierto inconveniente para la automatización. Dos precauciones en relación con estos inyectoros:

1. Los datos de caudal proporcionados por los catálogos de los fabricantes suelen referirse a agua pura. Los abonos líquidos, de mayor densidad, dan lugar a caudales menores.
2. Si por cualquier causa el depósito de abono se queda sin líquido, el inyector continúa trabajando inyectando aire en la red. Para evitar este inconveniente hay que colocar un dispositivo (Flotante, válvula automática, etc.) que cierre la tubería de toma en ausencia del líquido. Hace unos años era frecuente intercalar el inyector

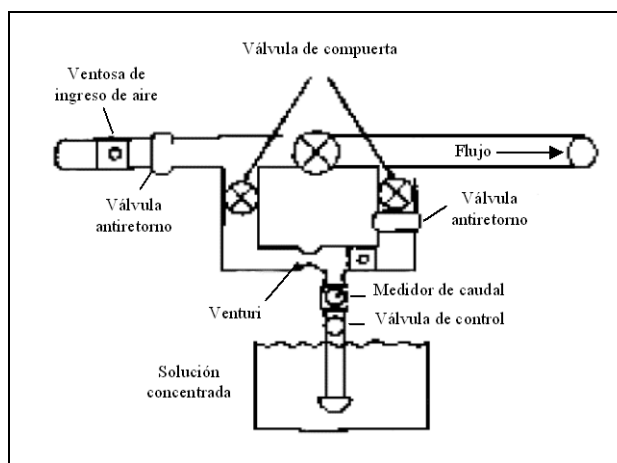


Figura 5. Instalación de un inyector venturi.

venturi no en paralelo, sino en la propia red, con el inconveniente que ocasionaba una pérdida de carga del orden del 30% de la presión.

Algunos métodos de inyección por venturi pueden generar presiones negativas, por lo cual permiten el ingreso de la solución concentrada desde tanques abiertos. Una porción del agua de riego se hace pasar a través del venturi en cuya garganta se genera la presión negativa. El sistema tiene la desventaja de ocasionar altas pérdidas que carga por fricción, tanto que a veces requiere usar bombas de relevo. La rata de inyección se regula mediante válvulas de control y medidores de flujo.

BOMBAS INYECTORA

EL método más preciso de inyección es aquel que utiliza una bomba inyectora. La energía mecánica requerida puede provenir de un motor eléctrico, de un motor de combustión interna o de un motor-

bomba de propulsión hidráulica. La mejor alternativa en cuanto a precisión, son las bombas de desplazamiento positivo, las cuales incluyen bombas de pistón sencillo (figura 5) o múltiple (figura 6), de diafragma, de engranaje y de rodillo (figura 7). Donde se requiere inyectar dos o más tipos diferentes de fertilizantes, existen unidades multibombas que pueden ser usadas a fin de disminuir el riego de que ocurran precipitaciones de productos químicos insolubles. Todas las bombas de inyección pueden ser reguladas para alcanzar la tasa de inyección deseada, generalmente se ajusta la carrera del pistón de la bomba, o variando el número de ciclos por minuto mediante juego de poleas o cambiando la relación de engranaje. Es posible también obtener un motor de velocidad variable.

Las bombas pueden ajustarse para recibir señales desde un medidor de flujo en cuanto a arranque y parada, esto hace más preciso el volumen de fertilizante inyectado. Donde se desee aplicar una concentración bien definida, será necesario conocer también el caudal del sistema en forma precisa. No han sido establecidas concentraciones estándar para aplicación con riego por goteo. La concentración de la solución de Hoagland modificada (medio-concentrada) puede ser utilizada como una guía para establecer concentraciones estables. Es posible monitorizar el estatus de los nutrientes en los tejidos, la concentración de nutrientes en el suelo, el pH del suelo, a fin de establecer los niveles adecuados de nutrimentos a aplicar.

Bomba inyectoras eléctricas

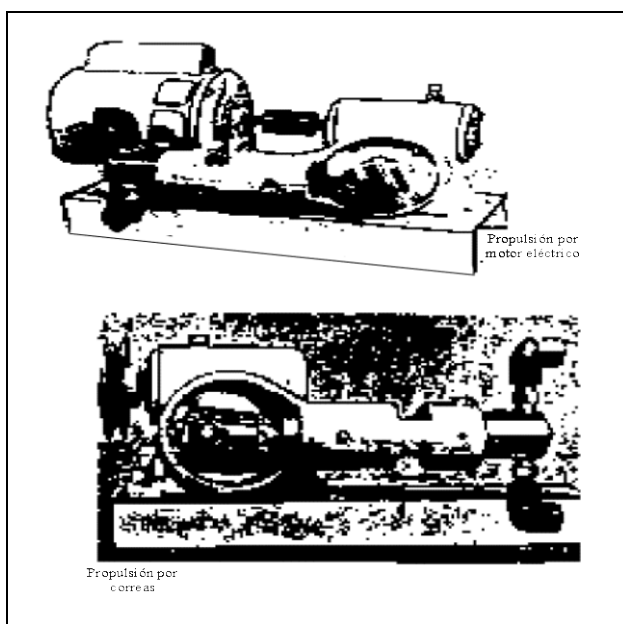


Figura 6. Bomba inyectora de un solo pistón marca JAECO (1500 l/h).

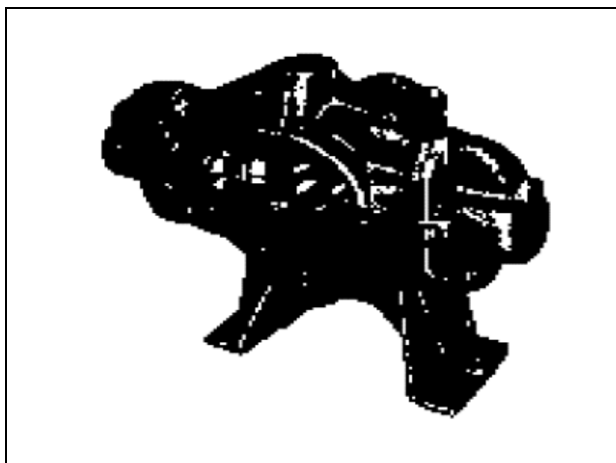


Figura 7. Bomba de pistón de dos cilindros con eje excéntrico (Hypro).

Consiste en una bomba (figura 8), normalmente de pistón o membrana, accionada por un motor eléctrico. Los caudales varían según los modelos desde 20 l/h hasta más de 600 l/h y además, para cada modelo, se puede regular el caudal, modificando la carrera de pistón o por otro procedimiento. La presión varía según modelos entre 4 y 12 atmósferas. La principal ventaja de estos dosificadores es la ya

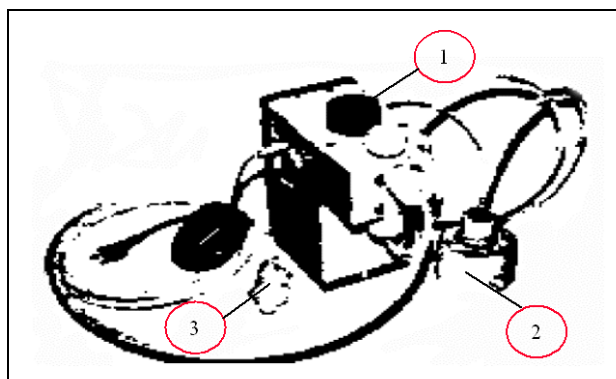


Figura 8. Bomba inyectora eléctrica. 1) Botón para establecer el caudal. 2) Manguera de succión. 3) manguera de descarga con sistema antiretorno.

citada posibilidad de regulación del caudal. Su inconveniente es la necesidad de suministro eléctrico y el precio. Deben construirse de materiales no corrosivos. En su instalación es imprescindible colocar los automatismos que impiden la inyección de abonos cuando no se están regando, lo que no sólo supondría una pérdida de dinero, sino que podría ocasionar obturaciones en los emisores.

Bombas inyectoras hidráulicas

Un dosificador hidráulico es una bomba constituida por una pequeña cámara que alternativamente se llena y vacía, accionada por la presión de la red de riego (figura 9). Cuando la cámara se llena, el dosificador succiona abono de un depósito y cuando se vacía, lo inyecta en la red.

El dosificador se coloca en paralelo con la tubería de riego, preferiblemente entre dos puntos donde haya una cierta diferencia de presión (regulador de presión, filtro, etc.). Algunos modelos necesitan una presión mínima de 2 Bars, lo que puede ser un inconveniente, sobre todo en riegos de muy baja presión. Pueden trabajar hasta con presión de 8 Bars. El circuito que proporciona el agua a presión para accionar el dosificador debe descargar en una tubería de drenaje, por la que se pierde un volumen de agua de aproximadamente el doble del fertilizante inyectado.

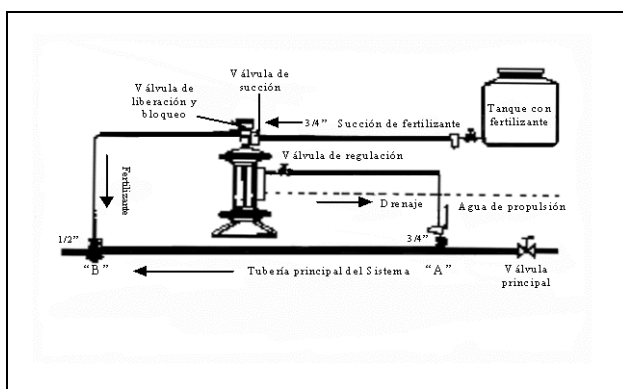


Figura 9. Esquema de instalación de la bomba inyectora hidráulica (TMB).

Cada latido inyecta un volumen constante, pero variando el ritmo de latido se puede modificar el caudal inyectado. Para ello se regula la válvula del circuito de accionamiento: cuando más abierto está mayor es la presión y más rápido el ritmo de emboladas. Además, colocando en dicho circuito una válvula volumétrica, se puede interrumpir la aplicación de abono cuando se ha inyectado el volumen deseado.

Los inyectoros hidráulicos presentan las siguientes ventajas:

1. No necesitan más fuente de energía que la presión de la red.
2. Se puede regular el caudal, normalmente entre 20 y 300 l/h. para caudales mayores se pueden

instalar varios dosificadores, aunque también hay modelos que llegan hasta 1.200 l/h.

3. Son fácilmente portátiles. El modelo de la figura 9 pesa 16 kg.
4. No provoca pérdida de carga en la red de riego

Entre los inconvenientes figuran:

1. Necesitan presión mínima de 2 atm.
2. Elevado precio.

CONTROLES ELECTRONICOS Y TRANSMISORES DE PULSO

El transmisor de pulso es un dispositivo capaz de convertir los pulsos emitidos por el inyector en señales eléctricas. Mediante este dispositivo, puede transmitirse la información con respecto a la cantidad de fertilizante o producto químico inyectado en la línea principal por el inyector a un sistema de control electrónico. El inyector, que deberá estar provisto de un sistema de paro hidráulico, estará entonces en condiciones de recibir instrucciones del sistema de control electrónico.

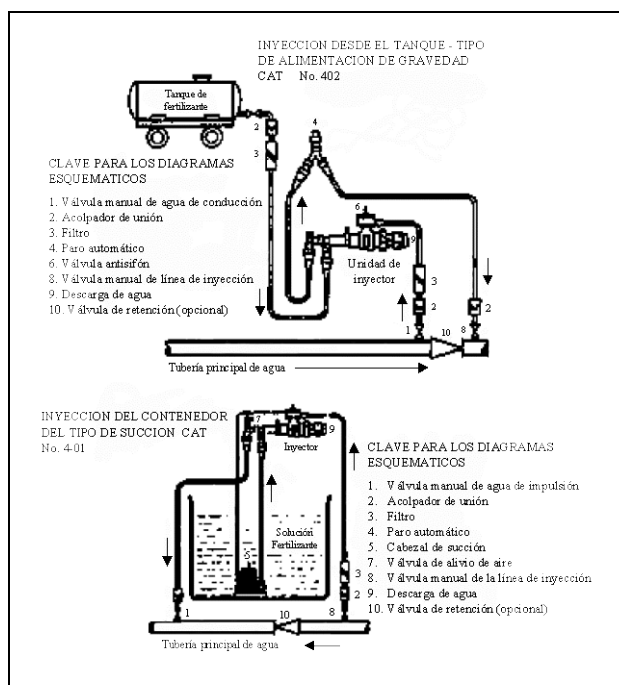


Figura 10. Esquema de instalación de la bomba inyectora de pistón Israelita marca Ein-tal.

OTROS SISTEMAS DE INYECCION DE ABONOS

Los sistemas más desarrollados utilizan como inyectores algunos de los aparatos descritos, y la sofisticación reside en la programación de su accionamiento. El caso más simple consiste en el empleo de relojes eléctricos que, en combinación con el riego, accionan la bomba dosificadora o unas electroválvulas que inician la aplicación de abonado. Con este sistema no se mide el volumen de abono aplicado, sino únicamente el tiempo que dura la inyección, lo que tiene el inconveniente de que si, por cualquier causa, varía el caudal de abono inyectado, varía también la cantidad total de fertilizante aplicado.

Un sistema muy perfeccionado consiste en el empleo de un computador que se aprovecha para programar el riego y la fertilización conjuntamente. El final de riego y del abonado se puede ordenar cuando ha pasado la cantidad deseada midiéndola en contadores. Una instalación de este tipo presenta el inconveniente de su elevado precio, al que hay que sumar las instalaciones anexas de válvulas solenoides, transistores de datos, etc., lo que hace que su empleo sólo se justifique en ciertos casos, y desde luego para superficies importantes.

CRITERIOS DE SELECCION

Como se ha visto, existe gran variedad de procedimientos de aplicar abonado a la red de riego. En este aparte se tratarán de los criterios a considerar para elegir entre ellos, lo que en cierto modo es un resumen de lo anteriormente expuesto. Los criterios de elección son:

Precios

En tanque y el inyector venturi son baratos. Los dosificadores, tanto eléctricos como hidráulicos son más caros. En cada caso concreto habrá que valorar el coste de las diferentes alternativas.

Fuente de energía

Los dosificadores eléctricos sólo se pueden instalar cuando se disponga de esta fuente de energía. Los tanques de abonado, inyectores venturi y dosificadores hidráulicos aprovechan la presión hidráulica de la red de riego.

Presión disponible

Algunos dosificadores hidráulicos necesitan presiones del orden de 2 atm.

Automatización

Digamos ahora que la automatización es fácil en los dosificadores eléctricos, realizando una programación con tiempo que no exige que se visite a diario la instalación. Los demás sistemas también se pueden dosificar por tiempo, utilizando electroválvulas, pero ello requiere disponer de energía eléctrica.

MECANISMO ANTI - CONTAMINANTE

Muchos usuarios de sistemas de riego presurizados, aspersión o localizado, están usando sus sistemas de riego para aplicar herbicidas, fertilizantes y otros productos químicos, conjuntamente con el agua de riego mediante una técnica que avanza día a día que se conoce con el nombre de Quimiorrigación.

Una de las ventajas que tienen los sistemas de riego por aspersión para aplicar productos químicos es que éste puede ser disuelto en una cantidad suficientemente grande de agua, la cual al penetrar en el suelo arrastra consigo el producto químico. La cantidad de agua requerida en el riego (lámina de agua aplicada) va a variar con el contenido de humedad del suelo y con el producto químico que es aplicado. Entre 0.5 y 2.5 cms de lámina de agua es aplicada frecuentemente con el producto químico dependiendo si es un herbicida o un fertilizante. Las ventajas de ésta operación estriban en que pueden ser realizadas bajo una completa automatización con un ahorro sustancial de mano de obra y costo de operación.

Una desventaja importante es el riego que existe de contaminar la fuente natural de agua con productos químicos altamente nocivos para la vida animal silvestre y humana. Por esta razón debe mantenerse sumo cuidado a fin de eliminar absolutamente este riego. Sistemas anticontaminantes han sido diseñados para evitar este riego. Entre las causas que pueden generar esta contaminación están las siguientes:

- Sobrecarga del tanque de solución concentrada como consecuencia de flujo inverso de agua desde el sistema hacia el mismo, el producto

vertido causara contaminación en la zona adyacente.

- Casos cuando la bomba de riego se detiene por fallas eléctricas o mecánicas, pero el sistema de inyección podría continuar operando con el consecuente sifonamiento del producto químico hacia la fuente.
- Retorno violento del agua como consecuencia de un golpe de ariete, lo cual trae consigo productos químicos hacia la fuente de agua.

Mecanismos de prevención

La prevención que hay que tomar, es que el sistema de bombeo para riego y el sistema de inyección de productos químicos deben ser interconectados, de forma tal, que al detenerse la bomba de riego, automáticamente se detenga la inyección de productos químicos concentrados. Los mecanismos de prevención anticontaminante son mostrados en la figura 11, para un motor de combustión interna (1), y para un motor eléctrico (2), funcionando sobre un pozo profundo.

Para los motores de combustión interna, la bomba de inyección de productos químicos, pueden acoplarse a él mediante sistemas de correas, el cual se instala directamente sobre el eje transmisor del motor. Para bombas de riego operadas mediante un motor eléctrico, se requiere un motor eléctrico adicional con una potencia ente 1/3 HP y 1/2 HP a fin de propulsar la bomba de inyección. En este caso se requiere que los controles eléctricos de ambos motores se encuentren interconectados a fin de que ambos se detengan si por alguna razón falla el motor de riego.

Para evitar la posibilidad de un retorno violento de agua debido al golpe de ariete, debe colocarse cerca en la descarga de la bomba de riego una estructura anti-ariete, el consta de una válvula de retención (Check-Valve) y una válvula ventosa de ingreso de aire (air-intel Valve). Estas dos válvulas deben colocarse entre el punto de inyección de productos químicos y la bomba de riego.

Para prevenir el retorno de agua hacia el tanque con solución concentrada desde la tubería de riego, será necesario colocar una válvula de retención sobre la tubería de inyección que va hacia la tubería de riego. Si esta válvula es omitida y por alguna razón se detiene el sistema de inyección, el agua presurizada de la tubería de riego fluiría hacia el tanque causando que se derrame la solución con-

centrada cerca de la fuente de agua pudiendo de esta forma contaminarla.

Una válvula solenoide pequeña, normalmente cerrada, (cerrada cuando no está activada), puede ser requerida en algunos tipos de sistemas de inyección. Este mecanismo provee una seguridad adicional que cierra la tubería en ambos sentidos, al faltarle energía eléctrica.

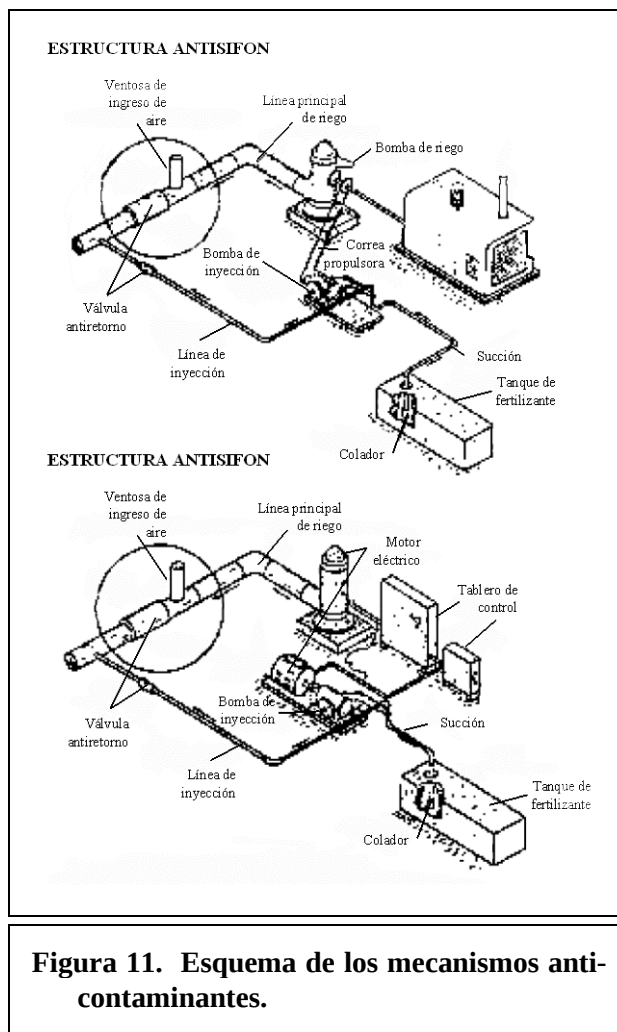


Figura 11. Esquema de los mecanismos anti-contaminantes.

ANÁLISIS Y PROGRAMACIÓN DEL PROCESO DE FERTIRRIGACIÓN

El plan real del calendario de fertilización de un cultivo regado con riego por goteo depende de las condiciones específicas locales; tales como, prácticas culturales, suelos, cultivos, áreas de riego, requerimiento de nutrientes, clima, suplenia, fuente, calidad y cantidad del agua. Adicionalmente, se tiene en cuenta el equipo de inyección de fertilizante y diseño del sistema. La tasa de inyección así como la concentración de la misma debe

ser calculada para evitar sobrefertilización. Cuando un sistema de riego por goteo es el principal proveedor de agua para los cultivos (zona árida), el requerimiento de nutrimentos por las plantas puede generalmente ser suplido mediante la aplicación de nutrimentos a una concentración igual o por debajo a la solución fertilizante típico (standard).

Según Nakayama y Bucks, la tasa de inyección de fertilizante al sistema de riego para una determinada tasa de aplicación sobre un área determinada, se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$qf = [F.A/cTi] \quad (1)$$

Donde:

- qf. Tasa de fertilizante que va a ser inyectado (volumen/tiempo)
 F: Dosis de fertilizante a aplicar (masa/área).
 A: Área que va a ser fertilizada
 c: Concentración de nutrimentos en el tanque de solución concentrada (masa/volumen)

$$Ti = \text{Tiempo de inyección}$$

Luego que la tasa de inyección, qf ha sido calculada, debe ser evaluada la concentración de nutrimentos en el agua de riego, esto puede hacerse mediante la siguiente ecuación:

$$Cw = (K.Fr/W) \quad (2)$$

En la cual:

- Cw: Concentración del fertilizante en el agua de riego (masa/volumen)
 K: Constante igual a 100 para unidades métricas
 W: Lámina brutal de riego a ser aplicada durante el período de inyección en unidades de longitud

Cuando la concentración de nutrimentos en el agua de riego Cw, ha sido seleccionada, la tasa de inyección puede ser determinada utilizando el caudal del sistema. La densidad y el porcentaje de nutrimentos en el fertilizante, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$qf = [K_2.Cw.Q/(p.r)] \quad (3)$$

En la cual:

- qf: Caudal de fertilizante a ser inyectado (vol/T)

- K₂: Constante igual a 0.36 para unidades métricas
 Q: Caudal del sistema (vol/T)
 p: Densidad de la solución concentrada (masa/vol)
 r: Porcentaje de nutrimentos que contiene el fertilizante

La concentración promedio más comúnmente usada oscila entre 4 y 100 ppm para la mayoría de los nutrimentos, cuando la fertilización es continua durante la estación de riego. La concentración necesaria depende del fertilizante y del cultivo, por lo tanto, es recomendable hacer análisis periódicos del suelo y del follaje.

La concentración resultante de un determinado fertilizante en el agua de riego, está dada por la siguiente ecuación:

$$Fw = [1/10 * F/(R.dt)] \quad (4)$$

Donde:

- Fw: Concentración resultante del fertilizante en el agua de riego (masa/volumen)
 dt: Lámina de agua total aplicada (longitud)
 F: Dosis de fertilizante a aplicar (masa/área)
 R: Relación tiempo de inyección a tiempo de riego. Generalmente 0.8

La tasa de inyección del fertilizante también fue definida por el Dr. Jack Keller, quien la expresa como el caudal de inyección (qf) en unidades de volumen/tiempo. El caudal de inyección dependerá de la concentración del líquido fertilizante y de la cantidad de nutrimentos deseables a ser aplicados durante el riego. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$qf = [F.A/C(C.R.Tr)] \quad (5)$$

Donde:

- qf: Tasa de inyección de la solución fertilizante en el sistema (masa/tiempo)
 Tr: Tiempo de riego total
 R: Relación tiempo de inyección a tiempo de riego. Generalmente 0.8
 F: Dosis de fertilizante a aplicar (masa/área)
 A: Superficie a fertilizar (área)
 C: Concentración de la solución fertilizante (masa/volumen)

A fin de lograr una buena uniformidad de aplicación ya desde el momento inicial y un eficiente

enjuague final del sistema de distribución, que disminuya el peligro de obturación, es recomendable una relación "r", tiempo de fertirrigación/tiempo de riego total, de 0.8. El 20% del tiempo de riego con agua sola conviene repartirlo en dos parcialidades iguales, al principio y final de período total de aplicación diaria.

El volumen de solución concentrada es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$V = (F.A/C) \quad (6)$$

Donde:

- V: Capacidad del tanque (volumen)
 F: Dosis de fertilizante a aplicar (masa/área)
 A: Superficie a fertilizar (área)
 C: Concentración de solución fertilizante (masa/volumen)

Para el cálculo de la capacidad del tanque habrá que conocer la dosis de fertilizante a dar en cada riego y su solubilidad.

BIBLIOGRAFIA

- Añez Reverol, Delso. Octubre de 1979. Uso de los bulbos de humedecimiento para estimar los parámetros preliminares de diseño de riego por goteo. III Seminario Latinoamericano sobre Riego por Goteo. Campiñas. Brasil.
- Añez Reverol, Delso. Octubre de 1979. "Metodología para la evaluación integral del riego por goteo". IV Seminario Latinoamericano sobre Riego por Goteo. Campiñas, Brasil.
- Armoni, Shlomo, 1984. Riego por goteo, Conceptos, Conceptos y Características. CINADCO. Israel, p. 99.
- Benami, A., a. Ofen. 1983. Irrigation Engeneering Scientific. Publications. (I.E.S.P.). Edición especial Haifa, Israel, p. 53-78.
- Bresley, E. 1977. Trickle-drip irrigation principles and aplications to soil-water management. Y Brady, N.C. (Ed.) Advance in Agronomy 20:343-393 Academic Press New York.
- Bucks, D.A. and Myers, L.E. 1973. Tricklen Irrigation: Aplication uniformity for simple amitter. Trnas. Amer. Soc. Agric. Eng. 16(6):1.108-1.111.
- Bucks, D.A. and Nakayama, F. s. 1980. Injection of fertilizer and other chemicals for drip irrigation. Proc. Agri-Turf Irrigation. Conf., Houston, Texas, Irrigation Association, Silver Spring, Maryland, PP. 166-180.
- Christiansen, J. E., 1942. Hydraulic of Sprinkler Systems for Irrigation. Trans. Amer. Soc. Civic Eng. 107.221-239.
- Fereres Castiel, Elias. 1981. Papel de la Fisiología Vegetal en la mircorrigación. Recomendaciones para el manejo mejorado. II Congreso latinoamericano de Microirrigación. Barquisimeto, Venezuela. pp. 30.
- Gillespic, V.A., Phillips, A. L., Andwu., I.P. 1979. Drip Irrigation Design equation; J. Irrig. Drain. Div. Amer. Soc., Civil Eng. 105 (IR3): 247-257.
- Golberg, D., Gornat, B. and Bar, Y. 1971. The Distribution of Roots Water and Mineral as a Result of Thickle irrigation. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 96:645-645.
- Golberg, S. Dan. 1975. Pronósticos y Perspectivas para el desarrollo del Riego en Israel año 1990. Centro Regional de Ayuda Técnica México/Buenos Aires. 26 p.
- Golberg, S. Dan. 1975. Métodos y técnicas de riego. Pub. De A.I.D. México.
- Golberg, D.S., Gornat, B. y Bar, Y. 1975. Distribución de las raíces, el agua y los minerales como resultado del riego por goteo. Pub. De la A.I.D. México.
- Golberg, S.D., Gornat, B. Hmueli, M., Benasher, I. Rimot, M. 1975. Aumento del uso agrícola del agua salina por medio del riego por goteo. Publicación de la A.I.D. México.
- Golberg, S.D., Romot, M. y Karw, M. 1975. Efectos de los intervalos en el riego por goteo, sobre la distribución y utilización de la humedad del suelo en viñedo. Pub. De la A.I.D. México.
- Golberg, D.D., Rimot, M. 1975. Abonado y uso de abonos conforme a las prácticas de riego por goteo. Publicaciones de la A.I.D. México.
- Gonzalez, L., Khan, L. 1989. Evaluación del sistema de riego por aspersión de CONARE-PROFORCA en Chaguarama, Edo. Monagas. Trabajo de grado. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica. Núcleo Monagas, Jusepín.
- Gornat, B. 1981. Riego por goteo. Principios y prácticas agrícolas. IV Seminario Latinoamericano de riego por goteo. Barquisimeto, Venezuela. pp 30.
- Hernandez Abreu, José M. y Rodriguez López, Jeseus. 1977. "El riego por goteo". M. Agricultura. Pub. Ext. Agraria. Madrid.
- Hernandez Abreu, José M. 1979. Algunas condiciones sobre el volumen de suelo mojado y su importancia en el diseño y eficiencia de sistemas de riego localizado. III Seminario Latinoamericano de riego por goteo. Campiñas. Brasil.

- Hernandez, Ramiro, Khan, Luisa. Y Gil M., Alexander. 1995. Evaluación del comportamiento hidráulico de varios emisores importados, para riego por goteo. UDO, Maturín, Venezuela. pp 140.
- Karmeli, D. and Keller J. 1975. Trickler irrigation design. Rain Birs Sprinkler Manufacturing Corporatio. Glendora, California, 133 p.
- Keller, J., and Karmeli, V. 1974. Trickle irrigation desing desing for optimal soil wetting. In 2nd. Intern. Drip irrigation Congress Proceeding, California. U.S.A. pp. 240-245.
- Keller, J., and Karmeli, D. 1974. Trickle irrigation desing parameters. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng. 17(4):678-684.
- Keller, jack. 1980. Thickle irrigation. S.C.S. national Engineering Handbook Section 15 Chapter 7. U.S.A.
- Khan, Luis. 1994. Quimioirrigación. Pricipios y aplicaciones. UDO. Maturín, Veenezuela. 250 p.
- Khan, Luis y gil, Alexander. 1995. Diseño de riego a presión. UDO – Departamento de Postgrado. Maturín, Venezuela. 450 p.
- Lafuente M., Francisco. Et al. 1980. Riego localizado. Instituto Nacional de reforma y Desarrollo Agrario. España, 74 p.
- Medina San Juan, I.A. 1978. Riego por goteo. Teoría y práctica. Mundi-Prensa. España. 205 p.
- Merea Camelo, Agustin. 1979. El riego por goteo: una alternativa válida para favorecer el incremento de la producción y productividad agrícola en los países Latinoamericano sobre riego por goteo. Campiñas. Brasil.
- Merriam, Jhon and Keller, Jack. 1979. Farm irrigation system evaluation. A guide for management. Ag & irrigation engineering.
- Nakayama, F. and Bucks, D. 1986. Trickler irrigation for crop production design, operation and management. Dev. in Ag. Eng. 9. Else veir, Arizona. U.S.A. 383 p.
- Nakayama, Francis S., Gilbert. R. G. and Bucks, D. A. 1978. Water treatment in trhickler irrigation and drainage decision, ASCE. Vol. 104. No. IR2, pp. 23-24.
- Nijelshon, Leon.1981. Fertilización en el riego localizado. IV Seminario de riego por goteo. Barquisimeto.
- Paraqueima, J. R. 1977. Study of some frictional characteristics of small siameter tubing for thickle irrigation laterals. Unpubl. M. S. Thesis Utah state University, Logan, Utah.
- Perez R. Francisco. 1982. Manual de riego localizado. UCV. Maracay, Venezuela. pp 150.
- Rasuri, R., L. 1988. Diseño de riego por goteo. RD 37, CIDIAT, Mérida, Venezuela. p. 170.
- Salassier, Bernardo. 1984. Manual de irrigacao. 3ra Edición. Impresa Universitaria. Universidad Federal de Vicos. Minas Gerais. Brasil.
- Villafañe, Roberto. 1981. Normas y procedimientos para el diseño y evaluación de sistemas de riego por goteo. U.C.L.A. Barquisimeto. 27 p.
- Zapata, Raul. 1990. Fertirrigación. Trabajo en preparación. U.D.O. Jusepín. Monogas. Inédito.

MANEJO DEL AGUA EN FERTIGACION

Marcelo Calvache U.*

INTRODUCCION

Cualquier cultivo durante su ciclo consume una gran cantidad de agua, pero cerca del 98% de este volumen de agua solamente pasa por la planta y se pierde en la atmósfera por el proceso de transpiración. Este flujo de agua es sin embargo necesario para el desarrollo vegetativo de los cultivos por lo que se debe tratar de mantener el agua en el suelo en niveles óptimos para cada cultivo.

El lugar de almacenamiento del agua en la agricultura es el suelo, el mismo que provee a las plantas a medida de sus necesidades. Como la recarga natural de este reservorio no es continua (lluvia), el volumen disponible para las plantas es variable. Cuando las lluvias son intensas, la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo puede ser superada y por lo tanto grandes cantidades de agua se pueden perder por escorrentía superficial o por percolación profunda.

Cuando la lluvia es muy escasa y poco frecuente, o en condiciones de invernadero, el suelo funciona como un reservorio de agua indispensable para el desarrollo vegetal. El agotamiento de esta reserva por un determinado cultivo exige una recarga artificial, la cual se produce mediante el riego.

Debido a estos factores, el manejo correcto del agua es un tópico de fundamental importancia. En regiones áridas o semiáridas, o en condiciones de invernadero, el manejo correcto del agua implica prácticas de riego que permitan una economía del agua y reduzcan el potencial de problemas por salinidad. En regiones de mucha precipitación, el problema fundamental es la lixiviación de nutrientes del suelo y el drenaje. En regiones donde la lluvia es suficiente, generalmente existen problemas en su distribución adecuada, lo que trae consigo problemas de falta de agua en determinados períodos del año. En estas áreas es muy importante lograr la mayor eficiencia posible en el uso del agua por los cultivos.

El manejo racional de agua implica el uso adecuado de este recurso con relación a la conservación de los otros factores del sistema suelo-planta-atmósfera. Esto significa mantener niveles adecuados de productividad de los cultivos, pero evitando la erosión del suelo y la contaminación de las aguas

subterráneas. Para esto son necesarios una serie de conocimientos prácticos, los mismos que se pretenden discutir en este artículo.

EL AGUA EN EL SUELO

El suelo es un sistema heterogéneo, disperso, poroso y polifásico. Las tres fases de naturaleza ordinaria son: la fase sólida que constituye la matriz del suelo; fase líquida que consiste del agua del suelo, la cual contiene sustancias disueltas y se llama más correctamente solución del suelo; y la fase gaseosa es la atmósfera del suelo.

Las proporciones relativas de las tres fases en el suelo varían continuamente y dependen de variables como clima, vegetación, y manejo. Este documento trata de las relaciones fundamentales entre la fase líquida (agua) y el suelo.

El suministro de agua al suelo, ya sea por riego, lluvia o flujos internos es indispensable para la germinación, crecimiento, desarrollo y producción de las plantas. El movimiento, contenido y disponibilidad del agua está determinado principalmente por las propiedades físicas del suelo, particularmente la textura, estructura, porosidad, profundidad y contenido de materia orgánica.

Buena parte del manejo del riego esta fundamentado en conocer como el proceso de evaporación afecta en forma cuantitativa la disponibilidad del agua, lo que define el volumen de agua a usarse y la frecuencia de restitución al suelo.

Hay que recordar que la dinámica del agua se establece sobre un sistema más complejo: el sistema suelo-planta-atmósfera, y por lo tanto el agua en el suelo es solo una parte de esa dinámica.

Relaciones de volumen y masa de los constituyentes del suelo

Las relaciones principales de volumen y masa entre las tres fases del suelo se definen con algunos parámetros básicos, los cuales son útiles en la caracterización de la condición física del suelo. La Figura 1 es una representación esquemática de un

* Profesor Principal, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central, Quito - Ecuador

suelo hipotético mostrando el volumen y masa de las tres fases.

La masa de las fases es indicada en el lado derecho del diagrama: la masa del aire M_a ; la masa del agua

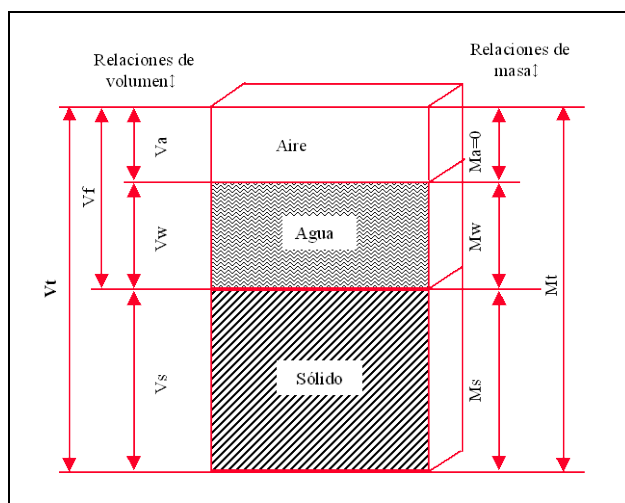


Figura 1. Representación esquemática de las tres fases del suelo.

M_w ; la masa de sólidos M_s ; y la masa total M_t . Los volúmenes de los mismos componentes son indicados en el lado izquierdo del diagrama: volumen del aire V_a ; volumen del agua V_w ; volumen de sólidos V_s ; volumen de poros $V_f = V_a + V_w$ y volumen total V_t .

Teniendo en cuenta estas condiciones se puede proceder al cálculo de diferentes parámetros que caracterizan las relaciones entre las fases del suelo y que son necesarios para el manejo del riego, como se detalla a continuación.

Densidad de sólidos o densidad de partículas (D_p)

Es la relación entre la masa del suelo seco (M_s) y el volumen ocupado por los sólidos del suelo (V_s).

$$D_p = M_s/V_s \quad (1)$$

En la mayoría de los suelos, la densidad media de partículas oscila entre 2.6 y 2.7 g/cc, siendo bastante confiable el valor de 2.65 g/cc.

Densidad aparente (D_a)

$$D_a = M_s/V_t \quad (2)$$

La densidad aparente expresa la relación entre la masa del suelo seco (105 °C por 24 horas) y el volumen total, incluyendo el espacio poroso. Obviamente la D_a es más pequeña que la D_p . En

suelos arenosos la D_a puede ser tan alta como 1.6 g/cc, en francos de alrededor de 1.2 g/cc y en suelos arcillosos cerca de 1 g/cc. En suelos de origen volcánico y en suelos orgánicos los valores pueden ser de 0.8 y 0.3 g/cc, respectivamente.

La densidad aparente se determina en muestras no disturbadas, preferiblemente a capacidad de campo, tomadas a la profundidad requerida con cilindros especiales de volumen conocido. Se llevan al laboratorio y se determina el peso de la masa de suelo seco.

Porosidad (f)

$$f = V_f/V_t \quad (3)$$

La porosidad es un índice de volumen relativo de poros en el suelo. Su valor oscila generalmente entre 0.3-0.6 (30-60%). Los suelos de textura gruesa tienden a ser menos porosos que los suelos de textura fina, aunque el tamaño medio de los poros en el primer caso es mayor. Sin embargo, es posible encontrar suelos de textura gruesa con alta porosidad, si estos contienen suficiente materia orgánica. La porosidad también puede ser calculada por la relación siguiente:

$$f = (D_p - D_a)/D_p = 1 - (D_a/D_p) \quad (4)$$

Humedad gravimétrica (H_g)

$$H_g = M_w/M_s \quad (5)$$

La relación de masa de agua (M_w) y masa de partículas de suelo seco (M_s) se le conoce como contenido de agua gravimétrico. El término suelo seco es generalmente definido como un suelo sometido a una temperatura de 105 °C durante 24 horas. La humedad gravimétrica es expresada algunas veces como una fracción decimal, pero más frecuentemente como un porcentaje.

En un suelo mineral que está saturado, la H_g puede oscilar entre 25 y 60%, dependiendo de la densidad aparente. El contenido de agua a saturación generalmente es más alto en suelos arcillosos que en arenosos. En el caso de suelos orgánicos el contenido de agua a saturación en base a la masa puede exceder 100%.

Humedad volumétrica (H_v)

$$H_v = V_w/V_t \quad (6)$$

La relación entre el volumen de agua (V_w) y el volumen total del suelo (V_t) se le conoce como contenido volumétrico de agua o fracción volumétrica de agua en el suelo. En suelos arenosos, el valor de H_v a saturación es del orden de 40-50%; y en suelos arcillosos de 60%. En este último caso, el volumen relativo de agua a saturación puede exceder la porosidad de suelo seco, debido a que los suelos arcillosos se hinchan, sobrehumedeciéndose.

El uso de H_v para expresar el contenido de agua es más conveniente que H_g , debido a que se puede usar directamente en el cálculo de flujos y cantidades de agua agregadas al suelo por riego o por lluvia, y en el cálculo de las cantidades extraídas del suelo por evapotranspiración o drenaje. También la H_v representa la profundidad de agua por unidad de profundidad de suelo (cm/cm).

Figura 2. Fenómenos de adsorción y capilaridad.

La H_v puede ser fácilmente obtenida a partir de la H_g y la D_a , mediante la siguiente relación:

$$H_v = H_g(D_a/D_w) \quad (7)$$

donde D_w es la densidad del agua (M_w/V_w), aproximadamente igual a 1 g/cc.

Grado de saturación (s)

Este parámetro expresa el volumen de agua presente en el suelo con relación al volumen de poros. El índice s oscila desde 0 en suelos secos a 1 (100%) en suelos completamente saturados. Sin embargo, la saturación completa es difícil de obtener en condiciones de campo debido a que siempre puede quedar aire atrapado entre el agua y las partículas sólidas.

Porosidad llena de aire (f_a)

$$f_a = V_a/V_t \quad (8)$$

Esta es una medida relativa del contenido de aire del suelo, y como tal es un criterio importante de aireación del suelo. Este índice está relacionado inversamente al grado de saturación s , esto es, $f_a = 1 - s$.

Retención y disponibilidad del agua en el suelo

Los suelos tienen diferente capacidad de retención de agua en función de sus características físicas -

químicas. Los factores que afectan la retención del agua en el suelo son: estructura, porosidad, profundidad, topografía, inclinación, textura, presión, temperatura, matriz, densidad aparente, estratificación, cantidad de solutos, espesor de la película del agua e histéresis del agua del suelo.

Así por ejemplo, un suelo franco representativo, en un campo cultivado contiene aproximadamente 50% de partículas sólidas (arena, limo, arcilla y materia orgánica), 25% de aire, y 25% de agua, pero solamente la mitad de esa agua está disponible para las plantas, debido a los mecanismos de almacenamiento del agua en el suelo.

Fuerzas de retención del agua

El suelo es un reservorio de agua, sin embargo, existen escapes. Cuando se añade demasiada agua, el exceso drena hacia las capas profundas del suelo. La fuerza de atracción entre los átomos de hidrógeno del agua y átomos de oxígeno de las superficies minerales del suelo o de otras moléculas de agua sostienen el agua en el suelo contra la fuerza de gravedad. La atracción de átomos de hidrógeno del agua para átomos de oxígeno de minerales es llamada fuerza adhesiva. La fuerza de atracción de átomos de hidrógeno del agua para átomos de oxígeno de otras moléculas de agua es llamada fuerza cohesiva. Cuando estas fuerzas combinadas ocurren en gran número, se mantiene una película de agua de considerable grosor sobre la superficie de las partículas de suelo.

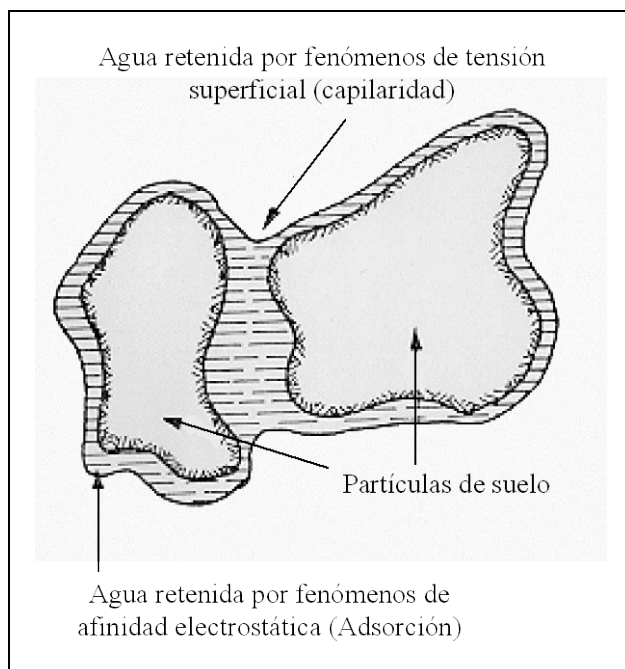
Debido a que las fuerzas que retienen el agua en el suelo son fuerzas de atracción superficial, entre mayor sea la superficie de las partículas coloidales del suelo (arcilla, materia orgánica), mayor es la cantidad de agua adsorbida (Figura 2).

Existe diferente nomenclatura para denominar la fuerza con que es retenida el agua (o la fuerza requerida para extraer el agua) del suelo. Las principales denominaciones son: succión, tensión, potencial de humedad y el más usado, potencial hídrico. Este es un número negativo, debido a que se requiere de un trabajo para remover el agua de las partículas del suelo.

El potencial hídrico ó potencial total del suelo (Ψ_T) se puede expresar en bares, pascales, atmósferas o una escala logarítmica de la columna de agua en cm(pF).

1 bar = 1000 mb = Pa;

1 atmósfera = 1013 mb = 1033 cm de H_2O .



El potencial hídrico, o mejor dicho el potencial total de retención de agua (Ψ_T) se puede expresar también como la suma de sus componentes conocidos de la siguiente forma:

$$\Psi_T = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_p + \Psi_o \quad (9)$$

de donde:

Ψ_m = potencial mátrico, el mayor contribuyente a la fuerza total de retención.

Ψ_g = potencial gravitacional o fuerza de gravedad.

Ψ_p = potencial de presión, o fuerza debido al peso del agua o presión del aire. Su magnitud es pequeña.

Ψ_o = el potencial osmótico, resulta de la concentración de sales y es apreciable en suelos salinos.

La textura del suelo

La textura se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla del suelo. La clasificación de estas partículas se hace de acuerdo a su tamaño. La arena constituyen partículas con diámetro de 0.05-2 mm, el limo de 0.05-0.002 mm y la arcilla menos de 0.002 mm.

La mayoría de los suelos contienen una mezcla de arena, limo y arcilla. Si predomina la arena los suelos se denominan arenosos. Si es la arcilla el elemento predominante el suelo se denomina arcilloso. Los limos están comprendidos entre las

arcillas y las arenas. Los suelos francos tienen textura media con cantidades prácticamente iguales de partículas de arena, limo y arcilla. La textura se expresa por medio de nombres de clases texturales que se encuentran en el triángulo de texturas (Figura 3).

La textura es una importante propiedad del suelo, ya que afecta la cantidad de área superficial expuesta

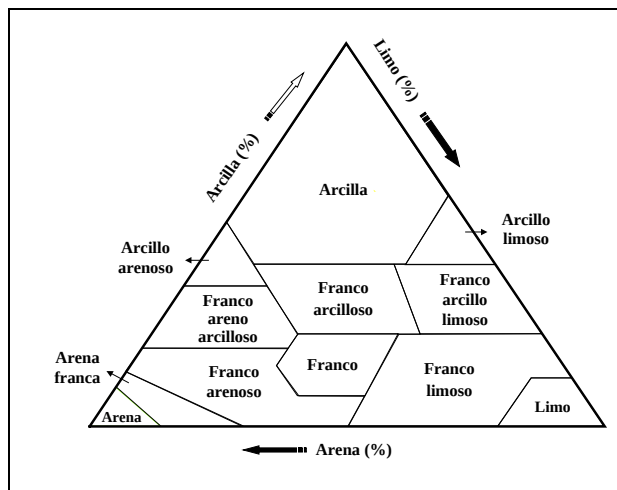


Figura 3. Triángulo de las texturas.

por el suelo y la cantidad y tamaño de poros. Al disminuir el tamaño de partículas, aumenta el total de área superficial disponible para la adsorción de agua y nutrientes, así como la cantidad y tamaño de poros que determinan la cantidad y velocidad del aire y del agua en el suelo. De esta forma, el movimiento, poder de retención y suministro del agua y la fertilidad, erosión y aireación del suelo están estrechamente relacionados con la textura.

Estructura y porosidad del suelo

La combinación de partículas fundamentales del suelo, formando mezclas o agregados produce la estructura del suelo. El grado de estructura que existe en un suelo afecta la cantidad y dimensiones de los poros, y por lo tanto tiene gran influencia sobre el movimiento del agua y la aireación del suelo. En consecuencia, la estructura se refiere a la naturaleza y grado de agregación de las partículas del suelo y la porosidad a la naturaleza y cantidad de espacio entre y dentro de estas partículas, es decir la fracción del volumen del suelo que esta ocupada por aire y agua.

Aunque existen varias clases de agregados reconocidas en la morfología de suelos, la estructura granular es la más importante en la producción de

cultivos, ya que se considera que esta estructura es la más conveniente para fines agrícolas.

Una propiedad importante de la estructura del suelo es la capacidad que tienen los gránulos de retener su forma cuando se humedecen y de permitir el paso de agua a través del suelo. A esta propiedad se lo denomina estabilidad estructural. Los gránulos de suelo deben tener suficiente estabilidad para que permitan el libre paso del agua y la entrada de aire conforme sale el agua. Un suelo estructuralmente bueno se desmorona con facilidad y es fácil de arar cuando está seco y no se vuelve pegajoso cuando se humedece (Figura 4).

El espacio poroso está formado por poros de diferente tamaño que comúnmente se clasifican en

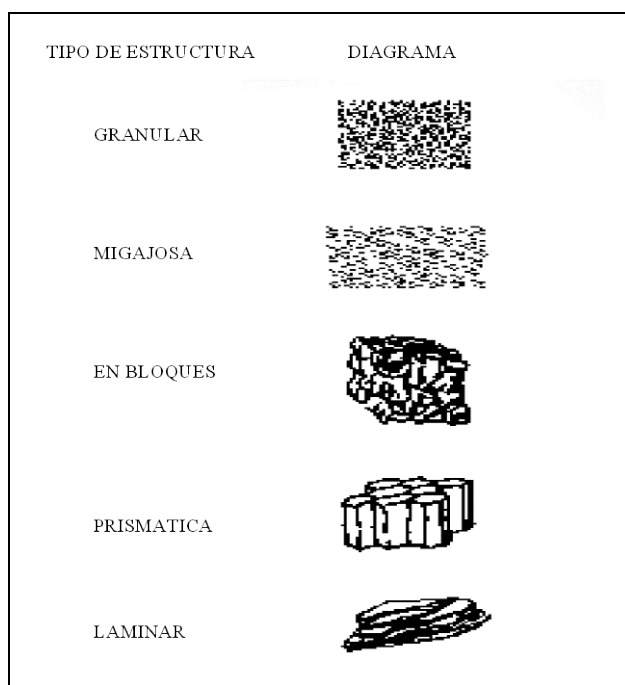


Figura 4. Tipos de estructura del suelo.

macroporos, mesoporos y microporos. En los macroporos el agua no se retiene, debido a la mayor fuerza de la gravedad con relación a la fuerza de retención. Esto da lugar al agua de percolación. La mayor cantidad de agua disponible para las plantas se encuentra en los mesoporos (0.1 a 5 atm.) El agua en los microporos es retenida con tal fuerza que no es disponible para las plantas (10-15 atm).

Consecuentemente, la proporción ideal de poros en el suelo es aquella que permite una rápida evacuación del agua, aireación adecuada y suficiente capacidad de retención de agua.

Profundidad del suelo

La profundidad efectiva del suelo, es decir el volumen de suelo que puede ser explorado por las raíces de las plantas, es un criterio importante en la selección de tierras para riego. Los suelos superficiales requieren de riegos frecuentes para que los cultivos se desarrollen. Cuando se riegan suelos superficiales que están asentados en arenas y gravas, se suelen presentar pérdidas excesivas por percolación profunda.

Los suelos profundos, de textura media y estructura suelta ayudan a las plantas a desarrollar un sistema radical fuerte, permiten el almacenamiento de grandes cantidades de agua y favorecen así un crecimiento satisfactorio de las plantas durante períodos relativamente largos entre riegos (Figura 5). Sin embargo, pueden haber limitaciones como la presencia de capas arenosas en el subsuelo, nivel freático alto, capas compactadas ó subsuelo rocoso. El volumen de agua realmente absorbido por las plantas es prácticamente similar para suelos

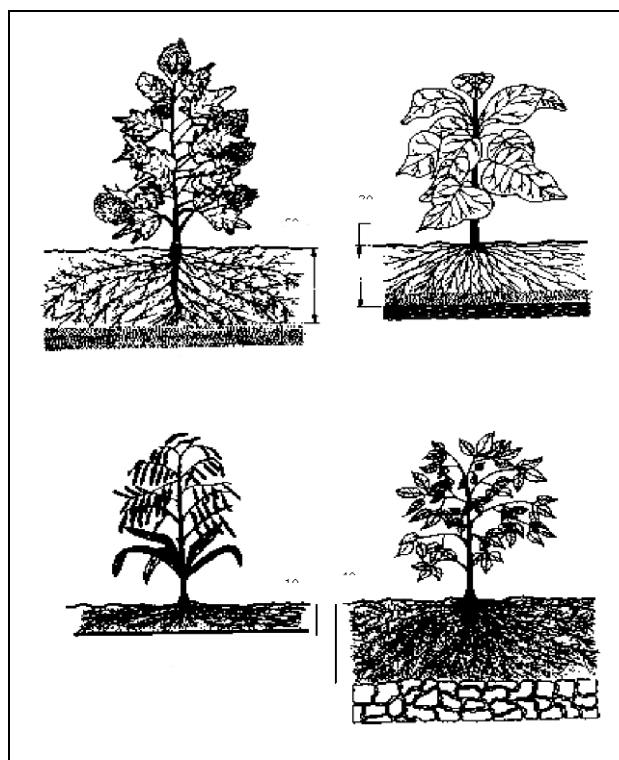


Figura 5. Profundidad efectiva del suelo.

superficiales y profundos. Sin embargo, se requiere mas agua durante el crecimiento para regar el cultivo en un suelo superficial que la que se necesita para el mismo cultivo en un suelo profundo. Esto se debe fundamentalmente a las pérdidas ocurridas durante el mayor número de riegos en suelos superficiales.

Mientras una profundidad de 150 cm es ideal en un suelo bien drenado, la experiencia a demostrado que

muchos cultivos anuales y perennes producen excelentes rendimientos con profundidades efectivas de suelo bien drenadas de 90 cm. Con buen manejo del cultivo y del riego, la mayoría de los cultivos dan buenos rendimientos con profundidades del suelo de apenas 50 cm. Una profundidad del suelo de 90 cm es frecuentemente considerada como el mínimo para un nivel de producción alto, con un manejo aceptable del cultivo.

Clases de agua en el suelo

Las partículas del suelo están rodeadas de poros de diferentes tamaños, donde se deposita el agua y el aire. Cuando se aplica suficiente agua a un suelo, sea por medio natural o artificial, todos los poros se llenan de agua. En ese momento existen en el suelo tres clases de agua: agua gravitacional o libre, agua disponible o capilar y agua higroscópica o no disponible (Figura 6).

El agua gravitacional es aquella que drena libremente del suelo debido a la fuerza de gravedad.

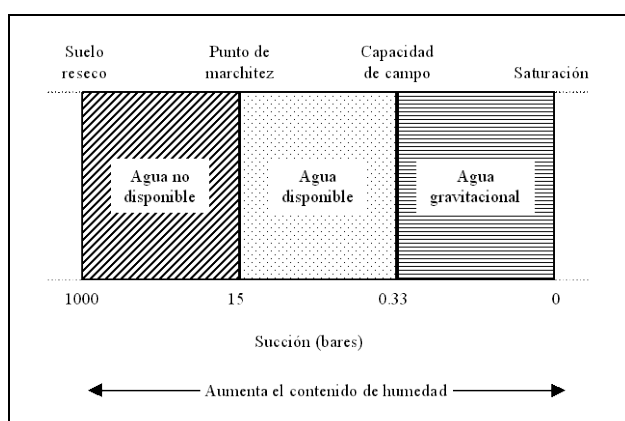


Figura 6. Clases de agua del suelo.

Ocupa un límite por encima de la capacidad de campo, por lo que en presencia de suelos bien drenados, esta agua drena sin causar daño directo a las plantas. El límite superior corresponde al estado de saturación, en el cual el agua ocupa toda la porosidad.

Esta agua es la principal causante de la pérdida de nutrientes y otras sustancias por lixiviación. Además, tiene influencia directa sobre la presencia y profundidad de la capa freática del suelo. Aunque el agua gravitacional permanece períodos cortos en suelos bien drenados, puede ser disponible para las plantas, si durante ese tiempo el suelo tiene una aireación adecuada.

El agua higroscópica es aquella retenida con una fuerza superior a la capacidad de las plantas para

extraer agua del suelo (punto de marchitez), por esa razón no interesa como fuente de humedad para los cultivos.

El agua disponible es la porción de agua almacenada en el suelo que puede ser absorbida por las raíces de las plantas para su crecimiento, desarrollo y producción. Se define como la parte de la humedad total retenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez.

El agotamiento de la humedad del suelo no es lineal, sino exponencial. A medida que disminuye la humedad, aumenta el esfuerzo o succión que necesita realizar la planta para extraer agua, por ese motivo algunos autores dividen la reserva hídrica del suelo en fácilmente aprovechable y difícilmente disponible (cierre progresivo de estomas debido al déficit hídrico).

La humedad del suelo es dinámica y varía en el tiempo y en el espacio en respuesta a las fuerzas del agua (capilar, gravitacional, absorción), debidas a percolación, evaporación, irrigación, lluvia, temperatura y el uso por las plantas.

Para fines agrícolas es necesario conocer, no solamente el estado actual de humedad del suelo, sino también los límites superior e inferior dentro de las cuales la planta puede absorber agua, para así poder planificar y diseñar en forma apropiada la cantidad de agua que debe aplicarse para suplir la deficiencia. Estos límites corresponden, aproximadamente a lo que se denomina capacidad de campo y punto de marchitez (Figura 7).

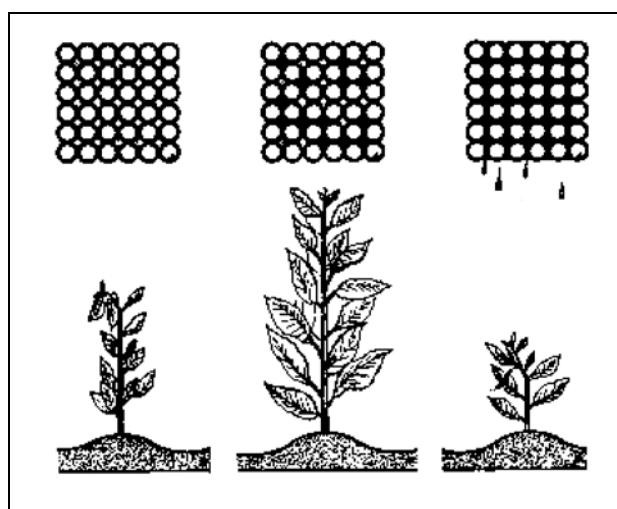


Figura 7. Conceptos de capacidad de campo, punto de marchitez y saturación del suelo.

Capacidad de campo

La capacidad de campo puede definirse como la cantidad máxima de agua que un suelo puede retener o almacenar, bajo condiciones de humedecimiento total seguido de drenaje libre (gravitacional).

En el campo, los suelos alcanzan esta condición solo momentáneamente. Esto se debe a que mientras el exceso de agua está aún drenando lentamente en las capas más profundas del suelo, parte del agua disponible de las capas superficiales está siendo evaporada desde el suelo o transpirada por las plantas. Determinar cuando el perfil tiene una "capacidad de campo promedio" es difícil de precisar, especialmente en suelos arcillosos.

La determinación de la capacidad de campo in situ se realiza delimitando, con bordes de madera o tierra de 20 cm par facilitar la filtración del agua, una área de muestreo de 1 m², en uno o varios sitios representativos del terreno. Posteriormente se humedece el suelo en forma progresiva hasta saturación, y se cubre con algún material impermeable como plástico para evitar la evaporación.

El tiempo que transcurre entre la aplicación de agua y el momento en que se alcanza la capacidad de campo depende del tipo de suelo, principalmente, su textura y varía de uno a cuatro días. Para suelos arcillosos se puede empezar el muestreo 48 horas después, en francos 24 horas después y en arenosos 12 horas, después de alcanzado la saturación. Los intervalos de muestreo pueden ser de 12 horas para suelos arcillosos, 6 horas para francos y 3 horas para arenosos.

El contenido de humedad se determina por el método gravimétrico con tensiómetros o con la sonda de neutrones. Posteriormente se hace un gráfico ubicando el contenido de humedad en las ordenadas y el tiempo en las abscisas. Con este gráfico es posible determinar el porcentaje de humedad correspondiente a la capacidad de campo de cada estrato definido, la cual se obtiene en el momento en que la curva se estabiliza (Figura 8).

La determinación de la capacidad de campo en el laboratorio se realiza saturando muestras no disturbadas, obtenidas a la profundidad deseada, las cuales se someten a una succión entre 0.1 y 0.3 bares (0.1 bar para suelos arenosos y 0.3 bares para suelos arcillosos). Esas muestras se pesan, luego se secan en estufa a 105 °C y se vuelven a pesar,

obteniéndose el porcentaje de humedad gravimétrico de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$Cc = (Psh - Pss) / Pss \cdot 100 \quad (10)$$

donde

Cc = capacidad de campo

Psh = peso de la muestra de suelo húmedo (g), a 0.1 - 0.3 bares.

Pss = peso de la muestra de suelo seco (g), a 105°C.

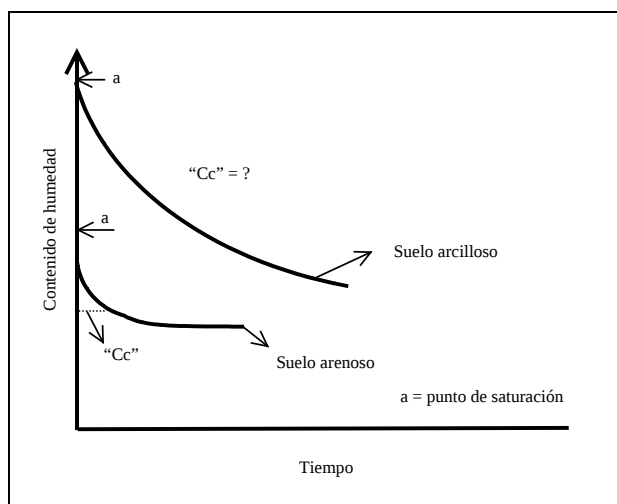


Figura 8. Determinación de la capacidad de campo.

Punto de marchitez

El punto de marchitez, a veces llamado punto de marchitez permanente, se define como el límite inferior de humedad aprovechable para las plantas. Por debajo de este umbral, las fuerzas de succión de las células de las raíces son insuficientes para extraer el agua retenida por el suelo.

En un día seco y soleado, una planta como el maíz, puede transpirar excesivamente y marchitarse temporalmente, aun cuando la humedad del suelo sea de 1 a 2 bares (agua realmente disponible). Sin embargo, la planta se recuperará fácilmente durante la noche cuando las pérdidas por transpiración son mucho menores. En contraste con esta marchitez temporal, el punto de marchitez indica la baja disponibilidad de humedad; en tales condiciones las plantas marchitas no se recuperan, a menos que se agregue agua al suelo.

Las plantas de diferentes especies y aun de diferentes variedades y cultivares tienen distinta capacidad para extraer agua del suelo, para resistir deficiencias hídricas. Por esta razón, la succión de 15 bares, considerada generalmente como punto de marchitez, es un promedio de poca rigurosidad técnica y científica.

Tradicionalmente la determinación del punto de marchitez en el laboratorio se ha realizado en forma similar a la indicada para la capacidad de campo, solo que en este caso las muestras son sometidas a una succión de 15 bares. Como se indicó en el párrafo anterior, este valor es solamente un indicador general del límite inferior de humedad del suelo a la que planta puede extraer agua.

Un método más costoso, pero más exacto de determinar el punto de marchitez es el denominado biológico. Aquí las plantas se siembran en macetas con suelo no disturbado y se dejan crecer hasta una altura adecuada (fin de la etapa juvenil). Posteriormente se suspende el suministro de agua y se deja secar el suelo hasta que las plantas marchitas no se recuperen cuando se someten a una atmósfera saturada de vapor de agua. Entonces se toman muestras de ese suelo y se determina el contenido de humedad.

El método anterior presenta limitaciones con cultivos perennes por lo que un método alternativo para determinar el punto de marchitez es efectuar observaciones directas en el campo, en parcelas destinadas a ese fin. Este método tiene la ventaja, a pesar de ser más cualitativo, de considerar toda la interrelación suelo-planta-atmósfera. En todo caso para fines de manejo de riego, el agricultor nunca debe esperar a que sus cultivos estén en punto de marchitez para hacer la aplicación de riego.

Cálculo de la disponibilidad agua en el suelo

El contenido de humedad del suelo sobre la base del peso (gravimétrica) puede ser transformado, como se indicó antes a la forma volumétrica, con lo que resulta de mayor utilidad agrícola. El volumen de agua es usado para determinar la cantidad que contiene o almacena un suelo, cuanta agua de riego se necesita aplicar y hasta que profundidad una lluvia o irrigación humedece el suelo. El volumen de agua se calcula de la siguiente forma:

$$H_v = H_g \cdot D_a \quad (11)$$

H_v = humedad volumétrica (%)

H_g = humedad gravimétrica (%)

D_a = densidad aparente del suelo (g/cc)

Conociendo el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo y en el punto de marchitez, se calcula, para una profundidad dada, la cantidad de agua disponible para las plantas que se puede almacenar en esa capa de suelo, como se indica a continuación.

$$A_d = (C_c - P_m / 100) \cdot P_f \quad (12)$$

A_d = agua disponible (mm)

C_c = humedad volumétrica a capacidad de campo (%)

P_m = humedad volumétrica en punto de marchitez (%)

P_f = profundidad de la capa del suelo (mm)

De igual manera, el almacenamiento de agua del suelo disponible para las plantas, a una profundidad determinada y en un momento dado, se calcula por la siguiente expresión:

$$A_d = (C_c - H_a / 100) \cdot P_f \quad (13)$$

A_d = agua disponible en un momento dado (mm)

C_c = humedad volumétrica a capacidad de campo (%)

H_a = humedad volumétrica actual del suelo (%)

P_f = profundidad de la capa de suelo (mm)

Efecto de la textura y la materia orgánica sobre la capacidad de retención de agua del suelo

La textura del suelo y el contenido de materia orgánica son importantes en determinar la cantidad de agua que los suelos pueden almacenar. Un aumento en el contenido arcillas y materia orgánica incrementa la capacidad total de retención de agua. La gran área superficial de estos componentes, ocasiona que una buena cantidad de agua sea retenida fuertemente a las superficies de adhesión.

En la Figura 9 se presenta la variación de la capacidad máxima de retención de agua disponible para diferentes tipos de suelo. Nótese que para la

mayoría de suelos agrícolas la relación entre la capacidad de campo y punto de marchitez es de aproximadamente dos. Por lo tanto, si se conoce cualquiera de las dos, el otro puede ser estimado aunque sea bruscamente para trabajos que no requieren mucho detalle. En todo caso la figura representa una guía útil en ausencia de información más detallada.

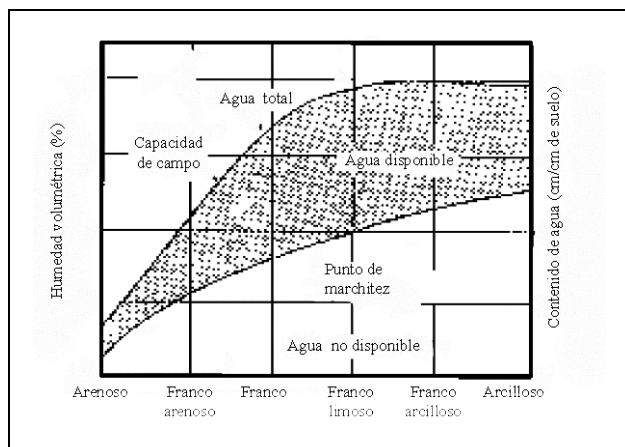


Figura 9. Influencia de la textura del suelo en la disponibilidad de agua.

A manera de ejemplo, si se toma en la figura anterior un suelo franco arenoso, se puede observar que la capacidad de campo corresponde a 21% (humedad volumétrica) y el punto de marchitez a 11%. Esto significa que 10% constituirá el porcentaje de agua útil, esto es 10 mm de agua por 10 cm de suelo, ó 80 mm de agua para una profundidad de 80 cm.

La capacidad de retención de agua de los suelos se puede calcular sobre la base de la textura, materia orgánica y profundidad, utilizando el procedimiento elaborado por Dumenil y Fenton, citados por Henao. Este método consiste en utilizar el triángulo de texturas del suelo, sobre la cual se han dibujado las líneas de isohumedad (Figura 10). Las líneas de isohumedad contienen la cantidad de agua retenida por el suelo, expresada en mm por cm de suelo.

Los datos se obtienen buscando en la Figura la línea de retención de humedad que cruza la clase textural. Este punto indica cuantos mm de agua se pueden retener por cm de profundidad. Luego este dato se corrige por el porcentaje de materia orgánica y se multiplica por la profundidad efectiva del suelo.

El agotamiento del agua disponible para las plantas también está en función de la textura. La Figura 11 presenta las curvas de agotamiento para varios tipos de suelos representativos. Así por ejemplo, para un

suelo franco, aproximadamente el 50% de agua disponible ha sido agotada cuando la tensión es de un bar. Los suelos de textura gruesa retienen menos de 50% de agua a esa misma tensión y los de textura fina retienen más.

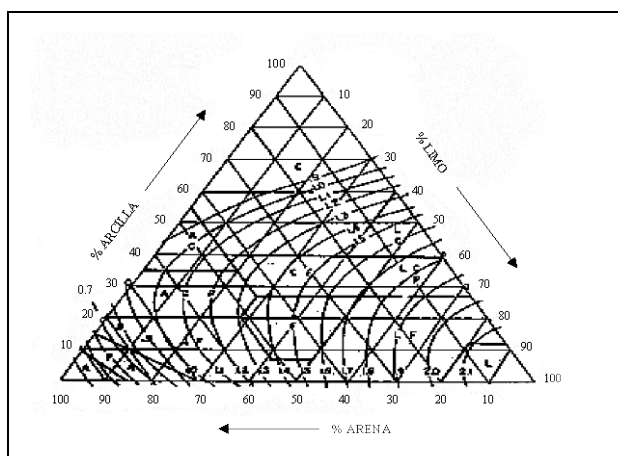


Figura 10. Triángulo de textura con líneas de isohumedad.

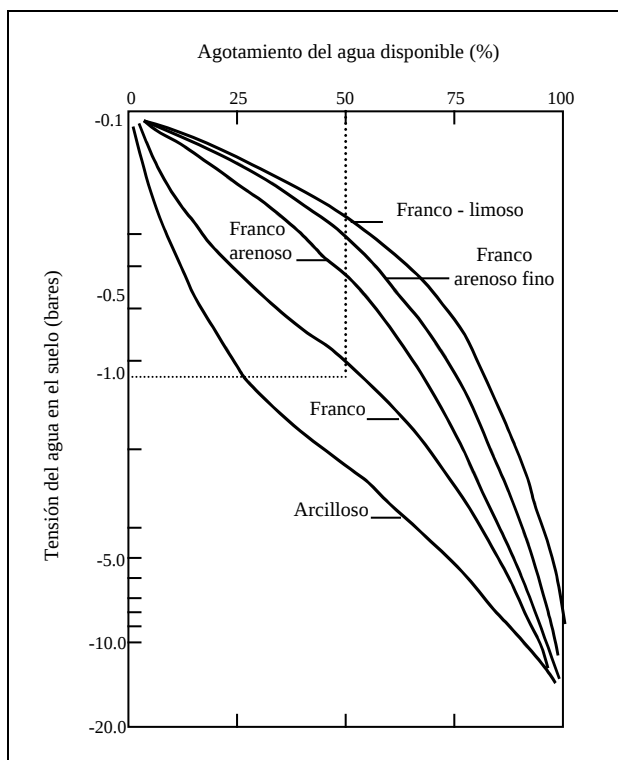


Figura 11. Curvas de agotamiento de agua para varios tipos de suelos.

Medición del contenido y potencial del agua en el suelo

La cantidad variable de agua en una unidad de masa o volumen del suelo y el estado de energía del agua

en el suelo son factores importantes que afectan el crecimiento y producción de las plantas.

La fracción por masa o volumen de agua en el suelo puede ser caracterizada en términos de humedad del suelo. La condición físico - química o estado del agua en el suelo es caracterizada en términos de energía libre por unidad de masa, llamado potencial. De los varios componentes de este potencial es el mátrico el que caracteriza la tenacidad con la cual es sostenida el agua por la matriz del suelo.

Humedad y potencial mátrico están relacionados uno al otro funcionalmente, y la representación gráfica de esta relación es llamada curva característica de humedad del suelo, a veces también llamada curva de pF (Figura 12). Tanto la humedad como el potencial mátrico varían ampliamente en el espacio y tiempo conforme el suelo es humedecido por la lluvia o riego, drenado por gravedad, y secado por evaporación y extracción por las raíces.

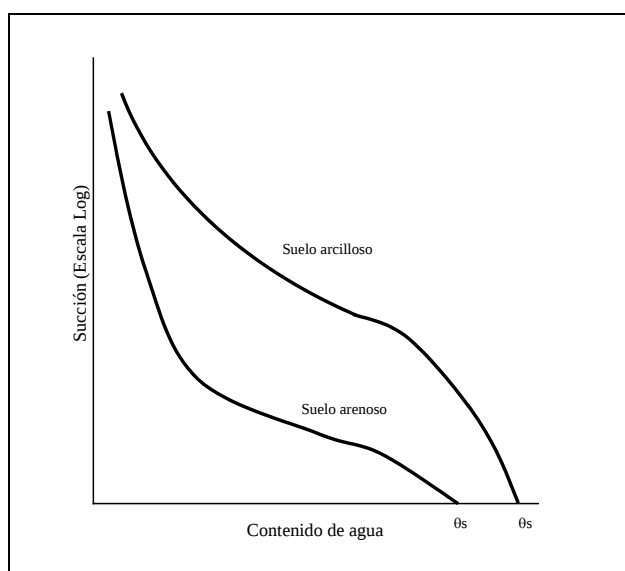


Figura 12. Curva característica de humedad del suelo.

Otros factores que dificultan las mediciones de agua en el suelo son el crecimiento disparejo de las plantas, la distribución no uniforme de las raíces, variaciones de textura, estructura y estratificación del suelo, alteraciones y cambios de densidad aparente, volumen poroso, tamaño de poros, características de infiltración y configuración de la superficie del suelo.

Contenido de agua en el suelo

El contenido fraccional de agua en el suelo puede ser expresado en términos de relaciones de masa o volumen, como se indicó anteriormente en este documento.

En muchos casos, es útil expresar el contenido de agua del perfil (cap) del suelo en términos de profundidad, o sea, el volumen de agua contenido en una profundidad específica del suelo (P) o almacenamiento de agua en el perfil (A) de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\text{cap} = H_v \cdot P \quad (14)$$

$$A = H_v \cdot P \quad (15)$$

Generalmente A se expresa en milímetros, igual que la lluvia y la evapotranspiración. Esta expresión indica la profundidad equivalente de agua en el suelo que potencialmente puede ser extraída. El resultado de esa expresión permite conocer el volumen total de agua (vta) contenido por unidad de área (a), por ejemplo una hectárea.

$$\text{vta} = A \cdot a \quad (16)$$

Métodos de medición del contenido de agua en el suelo

1) Método gravimétrico (muestreo y secado)

Consiste en tomar muestras a diferentes profundidades (generalmente intervalos de 10 cm) y sitios en el campo, obteniéndose luego un promedio de la humedad del suelo. El método es simple, no requiere equipo complicado y puede ser usado en todos los suelos agrícolas. Sin embargo, es lento y requiere de muchas repeticiones para reducir los errores debido a la variación del suelo.

Las muestras tomadas en el campo con el barreno se depositan inmediatamente en una caja de lata y se cierran herméticamente. Luego de pesarlas se secan hasta peso constante en una estufa a 105-110 °C, y se pesan nuevamente. La diferencia de peso, debida a la pérdida de agua, se divide por el peso del suelo seco y multiplicada por 100. Esto permite calcular el porcentaje de humedad sobre la base del peso seco.

2) Método de dispersión de neutrones

Este método, desarrollado de los años 50, ha ganado aceptación en el mundo por ser una técnica eficiente y confiable para medir la humedad del suelo en el campo. Frente al método gravimétrico, este método es menos laborioso, más rápido, no destructivo, de mayor resolución espacial, las mediciones se pueden repetir periódicamente en los mismos sitios y profundidades y es prácticamente independiente de la temperatura y la presión.

Las principales desventajas son el alto costo del instrumento, bajo grado de resolución espacial, dificultad de mediciones en la parte superficial del suelo, la operación y mantenimiento requiere de personal preparado, debido principalmente a los peligros asociados con la exposición a neutrones y radiación gamma.

El instrumento consiste de dos componentes principales:

- ✓ Una sonda, la cual contiene una fuente de neutrones rápidos y un detector de neutrones lentos. La sonda desciende dentro de un tubo de acceso insertado verticalmente dentro del suelo. Este tubo de acceso es generalmente de aluminio, ya que es casi transparente al flujo de neutrones, además sirve para estandarizar las condiciones de medida.
- ✓ Un medidor, generalmente portátil y de baterías, que mide el flujo de neutrones lentos dispersados por el suelo.

La fuente de neutrones rápidos generalmente es obtenida por mezcla de un emisor radioactivo de partículas alfa con berilio. Generalmente se usan mezclas de radio con berilio o americio con berilio. Tanto el radio como el americio emiten radiación gamma, pero la del americio es menos energética y por lo tanto menos peligrosa.

El método se basa en que la velocidad de neutrones rápidos emitidos por la sonda, ubicada a determinada profundidad del suelo, disminuye (pierde energía cinética) al chocar con los núcleos de hidrógeno presentes en el suelo. Dado que el agua es la única fuente de hidrógeno en el suelo y el núcleo de hidrógeno es el moderador más efectivo de neutrones rápidos, el número de neutrones lentos interceptados por el detector es una medida confiable del contenido volumétrico de agua en el suelo (Figura 13).



Figura 13. Sonda de neutrones.

A pesar de que se pueden realizar mediciones a cualquier profundidad, las determinaciones a menos de 20 cm de la superficie del suelo, pueden resultar erróneas debido a escapes de neutrones a la atmósfera, los que no son considerados por el contador de neutrones lentos. Para evitar este escape se puede utilizar un reflector especial de neutrones, colocado sobre la superficie del suelo, alrededor de la sonda. La esfera de influencia de la sonda es de aproximadamente 10 cm de radio en los suelos húmedos y 25 cm en suelos secos.

Aunque las curvas de calibración "universales" suministradas por las casas fabricantes de sondas de neutrones pueden ser directamente aplicables, en ocasiones lo ideal es calibrar en cada tipo de suelo y grupo de circunstancias en la cual será usada. La curva de calibración generalmente es una recta, por lo tanto de la forma $y = a + bx$, donde x es el valor de conteo de neutrones lentos, y es la humedad volumétrica del suelo, b es la pendiente de la recta y a es la intersección de la línea que relaciona y como una función de x .

Potencial de agua en el suelo

Las respuestas de la planta al riego están mejor correlacionadas con el potencial hídrico en el suelo

(o la succión) que con el contenido de agua. Se ha demostrado que el potencial de agua en la planta depende del potencial de agua en el suelo y de los grados de evaporación. En consecuencia, bajo condiciones de evaporación constante, la transpiración potencial puede mantenerse durante un período de secado, si el potencial de agua en la planta disminuye en el mismo grado que en el suelo. Sin embargo, cuando se alcanza el estado en el que el potencial de la planta cae hasta un punto donde la pérdida de turgencia cause el cierre de estomas, la transpiración se reduce marcadamente. Entonces, los potenciales de agua en el suelo y en la planta tienden a converger.

En consecuencia, la mejor medida de disponibilidad de agua para las plantas es el potencial hídrico del suelo. El principal componente de este es el mátrico, aunque en suelos salinos el potencial osmótico tiene también importancia.

El potencial mátrico se puede atribuir a la atracción del agua por el suelo mediante las fuerzas de adhesión y cohesión. En el campo este potencial puede medirse directamente con tensiómetros hasta -0.8 bares y los valores más bajos pueden calcularse por lecturas efectuadas en unidades de resistencia eléctrica calibradas, o utilizando la sonda de neutrones y la curva de retención. En el laboratorio pueden medirse mediante el uso de platos de presión. La medición combinada del potencial osmótico y mátrico puede hacerse mediante el uso del psicrómetro termopar o termocupla.

Métodos de medición del potencial del agua en el suelo

1) Método del tensiómetro

Los tensiómetros son ampliamente usados para medir la tensión del agua en el campo y laboratorio. Un tensiómetro consiste de una cápsula porosa de cerámica, conectada a través de un tubo lleno de agua a un vacuómetro o a un manómetro de mercurio. Los tensiómetros de mercurio son más sensibles y precisos que los de vacío (Figura 14).

El agua se mueve hacia dentro y hacia afuera de la cápsula porosa debido a que esta en contacto (por medio de los poros) con el agua del suelo y por lo tanto en equilibrio hidráulico. Cuando el suelo se seca, succiona agua de la copa porosa (gradiente hidráulico). En consecuencia, dentro del sistema se crea una tensión que aumenta gradualmente conforme el suelo se va secando. Cuando el suelo es humedecido por el riego o la lluvia, se invierte el

sentido de la succión y el agua fluye de nuevo al interior de la copa, al mismo tiempo disminuye la lectura del tensiómetro.



Figura 14. Instalación del tensiómetro en el campo.

La mayor crítica a los tensiómetros es que éstos funcionan en un ámbito de tensión de humedad del suelo menor a 0.85 bares. Esto no es tan serio como parece, debido a que cerca del 75% o más del agua disponible en suelos de textura gruesa y cerca de 25 a 50% en suelos de textura fina está en este ámbito (Figura 15). Los tensiómetros se han convertido en una herramienta de mucha utilidad en el manejo de riego, pero es indispensable calibrarlos en el sitio de uso para poder tomar en cuenta las condiciones particulares de suelo del lugar de medición. Generalmente los usuarios del tensiómetro no calibran el aparato y las lecturas del manómetro tienen poca utilidad.

La calibración se realiza en el campo mediante mediciones simultáneas de humedad volumétrica y la tensión (lectura del manómetro). De esta forma se obtienen una serie de puntos que se pueden correlacionar como se indica en la Tabla 1.

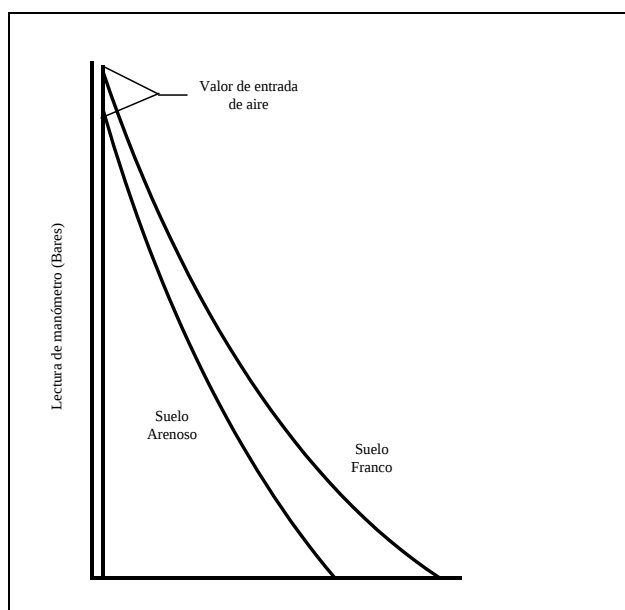


Figura 15. Curvas de calibración del tensiómetro en diferentes suelos.

Tabla 1. Lecturas de humedad volumétrica y de tensión en el proceso de calibración de tensiómetros. Correlación entre la humedad volumétrica y el log de la tensión.

Humedad volumétrica (Hv) cm ³ /cm ³	Lectura del tensiómetro (Pm) Centibares	Log de Pm
0.130	100	2.00
0.195	50	1.69
0.208	40	1.6
0.217	30	1.48
0.220	20	1.30
0.333	10	1.00

La ecuación de regresión obtenida con los datos de esta tabla es la siguiente:

$$Hv = 0.489 - 0.1804 \log Pm \text{ (cbs); } R=0.954$$

2) Método de resistencia eléctrica

Los equipos que miden la resistencia eléctrica permiten determinar el estado del agua en el suelo. Estas unidades están constituidas por dos electrodos contenidos en un material absorbente (poroso). Una vez instalados en el suelo los electrodos se obtiene un equilibrio entre su contenido de agua y el contenido de agua en el suelo. La resistencia a la transmisión de corriente eléctrica a través de sus electrodos varía con su potencial hídrico y este parámetro se registra en un medidor.

Todos los bloques porosos (electrodos) ubicados en el suelo tienden a equilibrarse con la succión (mátrica) de humedad del suelo, más que con la humedad del suelo per se. Por lo tanto, es preferible su calibración contra succión (tensión) antes que la calibración contra humedad del suelo, particularmente cuando el suelo usado para la calibración es una muestra disturbada de estructura diferente del suelo in situ.

Los materiales más comunes usados para hacer las unidades de resistencia eléctrica son el yeso, nylon y fibra de vidrio. Todas son afectadas por cambios de temperatura, dirección del cambio de humedad del suelo, por la salinidad y por el fenómeno de histéresis, aunque los bloques de yeso son los menos afectados. Los bloques de yeso son más sensibles en ámbito seco, mientras que los de nylon, debido al gran tamaño de los poros, son más sensitivos en el ámbito húmedo.

Una de las desventajas de los bloques de yeso es que, debido a su solubilidad, se deterioran en el suelo. Por lo tanto, la relación entre resistencia eléctrica y succión de humedad varía no solamente de bloque a bloque, sino también para cada bloque como una función del tiempo, debido a los cambios en la porosidad interna y distribución de tamaño de poros de los bloques. En general, el grado de confiabilidad de las unidades de resistencia eléctrica es limitado.

Mediciones de la curva característica de humedad

La curva característica de humedad del suelo **pF** se puede usar para relacionar mediciones de potencial mátrico (Y_m) con el contenido de agua en el suelo (H_v). Esta relación es comúnmente determinada en el laboratorio combinando platos de presión (columnas de agua) para bajas succiones (menos de 1 bar) y platos de alta presión para succiones mayores. Estos instrumentos permiten la aplicación de valores sucesivos de succión y la repetición de mediciones de equilibrio de la humedad del suelo a cada succión. (Figura 16).

Debido a que la retención de humedad del suelo es ampliamente afectada por la estructura y distribución de tamaño de poros, las mediciones deben realizarse sobre muestras no disturbadas, para que sean representativas de las condiciones de campo. En principio, parece aún mejor hacer determinaciones de la curva en mención, mediante toma de mediciones simultáneas de humedad (con una sonda de neutrones o por gravimetría) y de la succión

(usando tensiómetros) en el campo. El efecto de la estructura en la curva de humedad se presenta en la Figura 17.

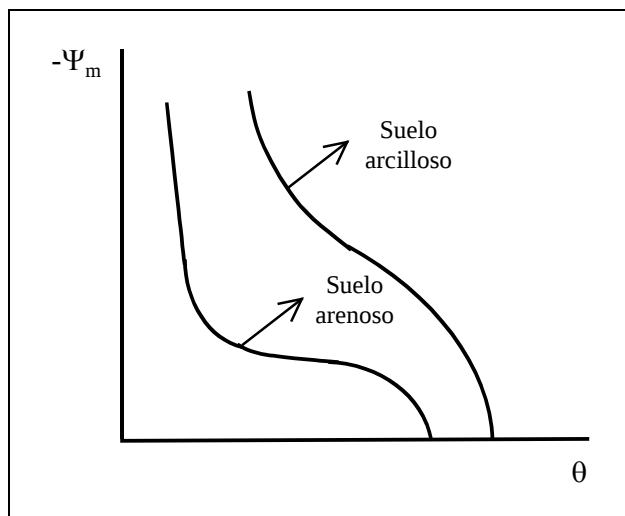


Figura 16. Curvas características de humedad en un suelo arcilloso y otro arenoso.

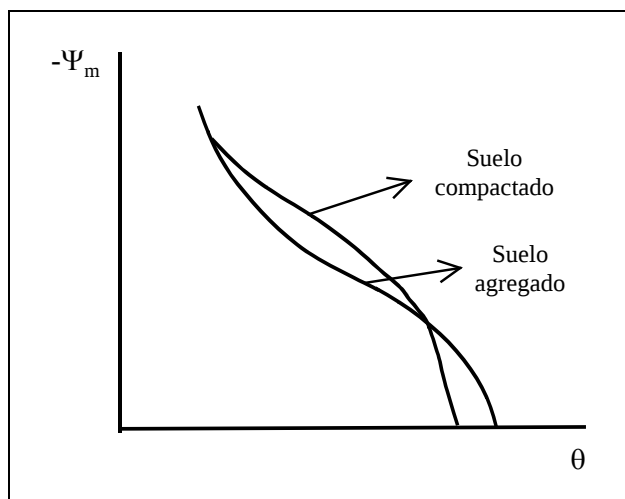


Figura 17. Efecto de la estructura del suelo en la curva de retención de humedad.

Histéresis

La relación entre humedad del suelo y potencial mátrico se puede obtener de dos formas diferentes: desorción y sorción. En el primer caso se toma una muestra saturada y se aplican succiones cada vez mayores para secar gradualmente el suelo, mientras se toman medidas sucesivas de humedad y succión. En el segundo caso, una muestra seca del suelo es humedecida gradualmente, mientras se reduce la succión.

Con cada uno de estos métodos se obtienen curvas continuas, pero generalmente no idénticas. El equilibrio de humedad del suelo a una succión dada es mayor en desorción (secado) que en sorción (humedecimiento) (Figura 18). A esta dependencia del equilibrio suelo-agua es denominada histéresis.

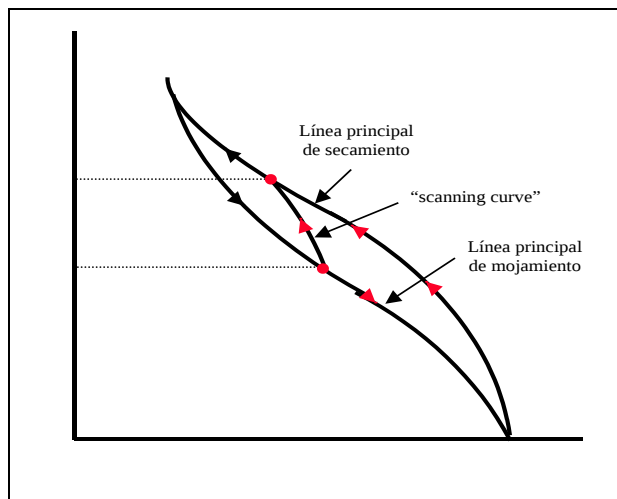


Figura 18. Fenómeno de histéresis en la curva de retención.

El efecto de histéresis se atribuye a varias causas: desuniformidad geométrica de los poros, efecto del ángulo de contacto del agua sobre las paredes sólidas de los poros, aire atrapado, etc. Debido a la complejidad del fenómeno de histéresis, éste es frecuentemente ignorado y la curva característica de relación potencial-humedad comúnmente reportada es la de desorción (secado).

La curva de desorción es aplicable a procesos que involucran drenaje, evaporación o extracción de humedad del suelo, sin embargo, la relación de sorción es necesaria cuando se estudian procesos de infiltración o humedecimiento del suelo.

CONOCIMIENTOS PRELIMINARES PARA EL RIEGO

Para que el agua de riego sea bien aprovechada por las plantas se debe satisfacer las siguientes inquietudes: cuanta agua utilizar, cuando se debe hacer el riego y como se debe aplicar el agua. Las dos primeras etapas se satisfacen con los cálculos preliminares de aplicación de agua, uso consuntivo, frecuencia o intervalo de riego, láminas de agua, etc. La etapa final de riego se refiere al método y las técnicas a emplearse para una buena conservación de los recursos utilizados.

CALCULO DEL AGUA DISPONIBLE

El agua disponible (AD) del suelo puede calcularse fácilmente si se conocen los contenidos de humedad correspondientes a la capacidad de campo (Cc) y punto de marchitez (Pm), las propiedades físicas del suelo y la profundidad que considerada para el riego que generalmente corresponde a la profundidad efectiva del sistema radicular.

La disponibilidad total de agua es una característica del suelo y corresponde a la cantidad de agua que el suelo puede almacenar por un determinado tiempo. Se puede expresar en lámina de agua por profundidad del suelo, generalmente mm de agua por m de profundidad del suelo o en volumen de agua por unidad de área (m³/ha).

$$AD = \frac{Cc - Pm}{100} \cdot Da \cdot p \quad (17)$$

Donde

AD = Agua disponible en mm/m de suelo
Cc = Capacidad de campo en % de peso
Pm = Punto de marchitez en % de peso
Da = Densidad aparente del suelo en g/cm³
p = Profundidad del sistema radicular

Capacidad real de agua del suelo (CRA)

En cultivos bajo riego, nunca se debe permitir que el contenido de humedad del suelo alcance el punto de marchitez. En otras palabras, se debe reponer el agua cuando se agote una fracción de la capacidad total del agua del suelo.

El factor de disponibilidad (f) varía entre 0,2 y 0,8. Los valores menores son usados para cultivos más sensibles al déficit de agua y los mayores para los cultivos más resistentes. De manera general, se puede dividir los cultivos irrigados en cuatro grandes grupos, como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Factor de disponibilidad del agua del suelo (f) (FAO, 1976).

Cultivos	Valor f
Ornamentales	0.2-0.4
Hortalizas y legumbres	0.2-0.6
Frutas y forrajes	0.3-0.7
Cereales	0.4-0.8

El valor de f a ser usado, dentro de cada grupo de cultivos, dependerá de la mayor o menor sensibilidad del cultivo al déficit de agua en el suelo y a la demanda atmosférica de la región. Para un mismo cultivo, cuanto mayor sea la demanda atmosférica menor será el valor de f. Es muy común el uso de f = 0.3 para ornamentales. El cálculo de CRA del suelo se logra con la siguiente ecuación:

$$CRA = AD \cdot f \quad (18)$$

El agua disponible total, generalmente aumenta a medida que la textura del suelo se hace más fina. En la Tabla 3 se presentan los límites comúnmente utilizados en las clases texturales básicas.

Tabla 3. Límites de agua disponible total de acuerdo a la textura del suelo.

Textura	AD (mm/m)
Arenosa	40-80
Franca	80-160
Arcillosa	120-140

Cuando se utiliza riegos localizados de alta frecuencia (microaspersión, goteo) supliendo la demanda atmosférica, no es necesario preocuparse del agua disponible total, pues siempre ésta se mantiene alta.

Determinación de láminas de riego

La lámina de riego se define como la cantidad de agua que se debe aplicar al suelo, dependiendo de la profundidad radicular o de la profundidad a la cual se desea llegar con el riego. Existen dos tipos de cálculos de la lámina de riego denominados lámina neta y lámina bruta, que consideran la eficiencia de aplicación de agua.

Lámina neta de riego

La lámina neta de riego es la cantidad de agua que se aplica al suelo y que en condiciones ideales es utilizada completamente por el cultivo. Existen dos procedimientos para calcular la lámina neta de riego: el procedimiento edafológico y el procedimiento analítico que se basa en la evapotranspiración real. Para efectos de cálculo y por simplicidad se recomienda utilizar el primer procedimiento.

Procedimiento edafológico

Este procedimiento se basa en la fórmula:

$$L = \frac{Cc - PMP \cdot P}{100} \quad (19)$$

Donde:

- L = Espesor de la lámina en mm.
Cc= Contenido de humedad en base a volumen a la capacidad de campo(0.10 a 0.3 atm)
PMP= Contenido de humedad del suelo en base a volumen a Punto de Marchitez Permanente 15 atm.)
P= Espesor o profundidad del suelo a ser humedecida en mm.

La capacidad de campo se define como el contenido de humedad de un suelo, después de haber drenado por 24 a 48 horas (de acuerdo a la textura), luego de haber sido completamente saturado. Para determinar este valor se puede usar varios métodos, entre los que se encuentran el método gravimético, las ollas de presión y el método del tensiómetro.

El punto de marchitez permanente o coeficiente de marchitamiento es el contenido de humedad de un suelo cuando las plantas se marchitan permanentemente y es el límite inferior de humedad aprovechable por las plantas. Se determina por el método gravimético, el plato de presión o la sonda de neutrones.

La profundidad a humedecer depende fundamentalmente del desarrollo radicular de las plantas, con la excepción del primer riego que tiene que ser muy profundo. Para determinar la profundidad de las raíces se puede utilizar como indicador la altura de la planta y la textura del suelo. Cuando un suelo es arcilloso se puede considerar que la profundidad radicular alcanza a un 50% de altura de la planta en sus primeras etapas de crecimiento. Cuando llega a la época de floración se puede decir que el sistema radicular ha alcanzado su profundidad total y ésta se puede determinar en base al 75% de la altura de las plantas. En un suelo de textura arenosa, se puede considerar una profundidad radicular del orden del 75% de altura de la planta en su primera etapa de crecimiento y a partir de la floración se puede considerar la altura de las plantas.

La ecuación 19, que sirve para determinar lámina neta de riego, se usa solamente para calcular el

primer riego a aplicarse en el suelo cultivado. Del segundo riego en adelante, hasta obtener la producción, se usa el criterio de riego de reposición a una humedad actual, en lugar del PMP.

$$L = \frac{(CC - HA) \cdot P}{100} \quad (20)$$

Donde:

- HA = Contenido de humedad actual del suelo que no provoca desórdenes fisiológicos en la planta. Humedad expresada en % en base a volumen.

El criterio de riego se fundamenta en que no toda el agua es aprovechable entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Se considera que para una buena producción (condición en la cual la planta no tenga alteraciones fisiológicas por falta de agua), el contenido mínimo de humedad en el suelo siempre tiene que estar entre CC y PMP. Normalmente, para plantas ornamentales se usa el 20%. Para determinar el valor de HA se usa la siguiente ecuación:

$$HA = Cc - ((Cc - PMP) \cdot f) \quad (21)$$

Donde

- f = El criterio de riego

A continuación se presenta un ejemplo del cálculo de la lámina neta de agua.

Cálculo de lámina neta para primero y segundo riegos de un cultivo ornamental.

Datos:

- | | | |
|---|---|--------|
| 1.Cultivo | : | Rosas |
| 2.Criterio de riego (f) | : | 20% |
| 3.Profundidad total de raíces y del suelo | : | 1.20 m |
| 4.Profundidad del segundo riego | : | 0.15 m |
| 5.Datos del perfil de suelo (Hv) | | |

Profundidad	Cc	PMP
0 – 20	30	18
20 – 50	28	19
50 – 100	27	19

Desarrollo:

Primer riego:

$$L = \frac{(Cc - PMP) \cdot P}{100}$$

En este caso el suelo es estratificado y el cálculo se hace capa por capa

$$0 - 20; L1 = \frac{(30 - 18) 200}{100} = 24,0 \text{ mm.}$$

$$20 - 50; L2 = \frac{(28 - 19) 300}{100} = 27,0 \text{ mm.}$$

$$50 - 80; L3 = \frac{(27 - 19) 300}{100} = 24,0 \text{ mm.}$$

Total en 80 cm de profundidad y una lámina de 75.0 mm.

L = 75 mm (primer riego, lámina neta)

Segundo riego

$$L = \frac{(Cc - HA) \cdot P}{100}$$

Cálculo del HA hasta la profundidad necesaria:

$$HA = (Cc) - (Cc - PMP) f$$

$$HA = 30 - (12) 0.2 = 30 - 2,4 = 27,6$$

Cálculo de la lámina neta hasta 15 cm de profundidad radicular:

$$L = \frac{(30 - 27.6) 150}{100} = 3.6 \text{ mm.}$$

Lámina bruta de riego

Normalmente la aplicación de agua no es uniforme, ni perfecta, debido a la heterogeneidad del suelo. Por esta razón es necesario aplicar un poco más de agua para uniformizar el riego hasta la profundidad de las raíces.

Este exceso de agua generalmente se pierde por percolación profunda (en algunos casos se agrega voluntariamente más agua para que se produzca lavado de las sales) y por escurrimiento superficial. Se lo considera para efectos de cálculo en la eficiencia de aplicación.

Para calcular la lámina bruta de riego se usa la siguiente ecuación:

$$LB = \frac{LN}{Ea} \quad (22)$$

Donde:

LB = lámina bruta de riego(mm).

LN = lámina neta de riego (mm)

Ea = eficiencia de aplicación (valor < 1)

La eficiencia de aplicación esta dada por el método de riego empleado, el grado de tecnificación del mismo, el cuidado en el manejo del agua dentro de la sistematización del terreno y del suelo. Para efecto de cálculo se recomienda usar las eficiencias de riego presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Eficiencias de aplicación en base al método de riego, considerando textura y nivelación constantes:

Método de riego	Eficiencia de aplicación (%)
Surcos	60-70
Aspersión	80-90
Goteo	90-95
Pozas	80-90
Melgas	70-80

A continuación se presenta un ejemplo del cálculo de la lámina bruta de agua.

Primer riego

$$LB = 7,50/0,90 = 8,3 \text{ cm}$$

Lámina bruta para el primer riego = 83 mm

Segundo riego

$$LB = 3.6/0,9 = 4 \text{ mm}$$

Lámina bruta a aplicar al suelo en segundo riego = 4 mm

Las láminas de riego se pueden expresar no solamente en espesor (mm) sino también en volumen o caudal, si se considera el área que se va a cultivar y el tiempo en el cual se debe regar. Para esto se emplean las siguientes ecuaciones:

$$1\text{mm} = 1 \text{ litro/metro cuadrado} \quad (23)$$

$$Q \cdot t = A \cdot L \quad (24)$$

Donde:

Q = Caudal (l/seg)

L = Lámina de agua (mm)

A = Área de riego (en m²)

t = Tiempo de riego (segundo, minuto, hora)

Ejemplo de cálculo del volumen de riego.

Calcular el tiempo de riego, si el caudal de riego es 0,27 m³/seg la superficie total es 5 ha y la lámina a aplicar es 10.5 mm.

$$t = \frac{50000 \text{ m}^2 \cdot 10.5 \text{ l/m}^2}{270 \text{ l/seg}}$$

$$t = 1944,4 \text{ seg.}$$

$$t = 32,4 \text{ minutos}$$

Determinación de la evapotranspiración

En el punto anterior se calculó la lámina de riego que aplicada al suelo está a disposición del sistema radicular. Las plantas consumen diariamente una cantidad de agua y otra se pierde por evaporación de los suelos adyacentes a las plantas. La suma de estas porciones de agua representa la evapotranspiración.

Dicho de otra manera, la evapotranspiración consiste en la absorción de agua a través de las raíces de las plantas, que es utilizada en las diferentes actividades fisiológicas y emitida a través de los estomas hacia la atmósfera, y además el agua evaporada por el suelo en el que se encuentran las plantas y la evaporada desde la superficie de las hojas.

Para efecto de cálculo de la cantidad de agua a utilizarse se considera la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración actual (uso consuntivo).

Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial (ETp) es aquella que se produce de una vegetación de poca altura en activo crecimiento, preferentemente pastos, que cubre integralmente el suelo y sin restricción de humedad disponible en el suelo. Este parámetro se usa como un índice para determinar la evapotranspiración real de los diferentes cultivos.

La ETp puede medirse por procedimientos directos, utilizando lisímetros y mediante la ecuación del balance hídrico, e indirectamente utilizando el tanque de evaporación MC (Figura 19). En este artículo se discute el procedimiento de estimación de la ETp utilizando el evaporímetro (lisímetro) MC, porque se considera que este procedimiento más recomendado para nuestro país. En este caso se asume que la ETp es igual a la evaporación medida en el evaporímetro MC.

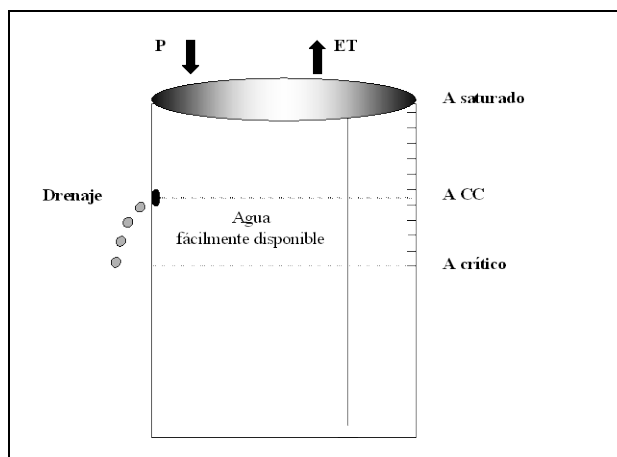


Figura 19. Diagrama del lisímetro MC.

Evapotranspiración real

La cobertura vegetal varía a lo largo de desarrollo de un cultivo (desde la siembra hasta la cosecha), lo que hace que se modifique la transpiración. Esta modificación se debe además a las condiciones edáficas y a los niveles de humedad en el suelo.

La evapotranspiración actual (ETr) es la que se produce en forma real día a día, de acuerdo al crecimiento de la planta, las características edáficas y la disponibilidad de agua. En condiciones de un suelo normal, con un buen suministro de agua, el factor decisivo en la ETr es el crecimiento del cultivo. La ETr se determina usando la siguiente ecuación:

$$ETr = ETp \cdot Kc \quad (25)$$

Donde:

ETr = Evapotranspiración real en mm
 ETp = Evapotranspiración potencial en mm
 Kc = Coeficiente de cultivo que depende del estado de crecimiento del mismo

Ejemplo de cálculo de la evaporación actual para el cultivo de fréjol entre los meses de julio a noviembre en la zona de Tumbaco.

Datos

Evaporación en el lisímetro MC (ETp) = 90 mm
 No hay restricciones de suelo y humedad
 Coeficiente de cultivo varía de 0.4 en inicio de crecimiento a 1.0 en la floración
 Valor promedio para el mes de julio en base a la curva Kc = 0.40.

Determinación de la evapotranspiración real

Utilizando las ecuaciones presentadas anteriormente:

$$\begin{aligned} \text{ETr} &= \text{ETp} \cdot Kc \\ \text{ETr} &= 90 \cdot 0,4 = 36 \text{ mm} \end{aligned}$$

Frecuencia de riego

Para determinar la frecuencia de riego existen dos procedimientos prácticos: Uno empírico que se basa en una relación matemática y otro analítico que se basa en la realidad del campo y es eminentemente práctico.

Método empírico

Este método se basa en la siguiente fórmula:

$$\text{FR} = L / \text{ETr} \quad (26)$$

Donde:

FR = Frecuencia de riego
 L = Lámina de riego que almacena el suelo (lámina neta)
 ETr = Evapotranspiración real ó uso consuntivo promedio diario para ese período

Ejemplo de cálculo para determinar la frecuencia requerida de riego para el cultivo de babaco con un consumo diario, en la etapa de floración, de 4 mm por día.

Datos

Lámina neta aplicada al suelo en esa época = 40 mm
 Uso consuntivo diario = 4 mm

Utilizando la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} \text{FR} &= 40 / 4 = 10 \text{ días} \\ \text{Intervalo de riego} &\text{ cada 10 días} \end{aligned}$$

Método práctico

Este método se basa en la realidad de campo. El método anterior no puede considerar el aumento de espesor de lámina de agua ocasionada por efectos de precipitación natural por ejemplo. El método práctico en cambio considera todos los aumentos ocasionados por diferentes circunstancias, ya que consiste en determinar diariamente el contenido de humedad en ese suelo en diferentes sitios en el campo, ya sea con tensiómetros, bloques de resistencia o por el método gravimétrico.

Para esto, una vez aplicado el riego, se instala los instrumentos señalados y se registra diariamente las lecturas. Cuando se llega a cierto valor predeterminado, nuevamente se aplica riego. Ese valor predeterminado es el índice que determina falta de humedad en el suelo, ó es el límite inferior de humedad en el suelo para buen aprovechamiento de agua por la planta, que no altera ningún proceso fisiológico y que no afecta la producción. Este valor hay que determinarlo con anticipación y se puede utilizar como criterio de riego o factor f (Figura 20).

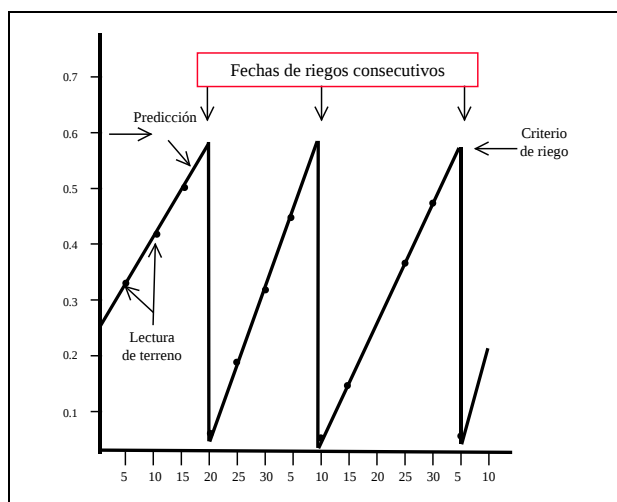


Figura 20. Determinación de la frecuencia de riego utilizando tensiómetros.

BIBLIOGRAFIA

- Baver, L.D., W. G. Gardener and W. R. Gardener, W.R. 1972. Soil Physics. John Wiley & Sons, Inc., New York. 4 Ed. Capítulo 8.
- Calvache, M. 1993. Requerimientos hídricos de los cultivos en Tumbaco, Pichincha, Universidad Central del Ecuador. Quito, P.V.
- Childs, E.C. 1969. An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena. Wiley Interscience, New York. Capítulos 7 y 8.
- Day, P.R., G.H. Bolt, and D.M. Anderson. 1967. Nature of Soil Water. In "Irrigation of Agricultural Lands", R. Hagan (ed). Agronomy N° 11. Capítulo 12. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A.
- Dorenboos, M., and W.O. Pruitt. 1975. Crop water requirements. Artículos de riego y Drenaje N° 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma.
- FAO. 1976. Riego y Drenaje; Las necesidades de agua de los cultivos. Roma. p. 31-126.
- Gairon, S., and A. Hadas, A. 1973. Measurement of the water status in Soils. In "Arid Zone Irrigation". Xaron, B., Danfors, E. Y Vaadia, Y., eds Springer - Verlag, Berlín.
- Gardener, W.H. 1967. Water Content. In "Methods of Soil Analysis", Parte I., Black, C.A., ed. Agronomy N° 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A.
- Gurovich, L. y J. Galleguillos. 1979. Relaciones hídricas de algunos velos del Valle del Río Aconcagua establecidas a partir de muestras tamizadas y no disturbadas. Ciencia e Investigación Agraria 6(4): 251-264.
- Henao, J. 1976. Soil variables for regressing Iowa corn yields on soil, management, and climatic variables. Tesis Ph. D., Iowa State University. 315 p.
- Hillel, D. 1971. Soil and Water. Physical Principal and Processes. Academic Press, New York. Capítulo 3.
- Irsaelsen, O.W., and J.E.Hansen. 1962. Irrigation Principles and Practices. John Wiley and Sons, Inc., New York. pp. 171-184.
- Jensen, M.E. 1973. Consumptive use of water and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers, Special Publication. 143 pp.
- Kirkham, D., and W.L. Powers. 1972. Advanced Soil Physics. John Wiley & Sons, New York. Capítulo 1.
- Marsh, A.W. 1975. Questions and Answers about tensiometers. Division of Agricultural Sciences, University of California. Leaflet 2264.
- Veihmeyer, F.I., and A.H. Hendrickson. 1977. Soil moisture conditions in relation to plant growth. Plant Physiol. 2: 71-78.

PRINCIPIOS BASICOS DE FERTIRRIGACION

J.Z. Castellanos *

INTRODUCCION

La aplicación de fertilizantes a través de los sistemas de irrigación se le conoce con el término: **Fertirrigación**. Esta práctica ha cobrado mucha importancia en las dos o tres ultimas décadas. Solo para citar un ejemplo de ello, entre 1981 y 1985 el área dedicada a sistemas de microirrigación en el mundo se incremento de 400,000 a 1.1 millón de hectáreas (Abbot, 1988). Sin embargo para 1996 tan solo los estados de California y Arizona estaban utilizando estos sistemas en 1.5 millones de hectáreas, lo que equivale al 15% de la superficie de riego en esos estados (Thompson, 1997). Otros países han invertido grandes sumas en incrementar su superficie bajo sistemas de microrirrigación. En México se espera invertir mas de 5,000 millones de dólares en los próximos 5 años en el establecimiento de sistemas de fertirrigación (Comunicación personal Firco, 1997). La causa principal de este dramático aumento y del inusitado interes en estos sistemas se explica en a) El agotamiento de las reservas de agua, principalmente las de origen subterráneo y b) El alto potencial de rendimiento que ofrece este sistema de manejar eficientemente el agua y fertilizantes.

En la Tabla 1 da una idea del grave problema que vivirá el mundo en algunos años debido al agotamiento de las reservas de agua. Los datos del año 2025 son una proyección de la demanda actual, la cual será muy difícil de abastecer. No es exagerada la aseveración de que en el futuro las guerras no serán por petróleo sino por agua. Por otro lado es notorio que la principal actividad consumidora de agua en el mundo es la agricultura, que utiliza mas del 70% del total.

Solo para dar una idea del gran potencial que existe en el uso de los sistemas de fertirrigación, en la Tabla 2 se muestran los datos de consumo de agua, producciones y eficiencias de uso del agua del tomate en varios sistemas de producción.

Los datos de la Tabla 2 indican la potencialidad de los sistemas de fertirrigación para producir grandes cantidades de cosecha con escasos volúmenes de agua. Esto explica parcialmente el creciente interés

que se ha generado en el uso de sistemas de riego de alta eficiencia para poder hacerle frente a la creciente escasez del vital líquido. Analizando los datos de las Tablas 1 y 2 nos preguntamos por que razón no han proliferado extensivamente estos sistemas de producción y las razones son de tipo económico y de tipo tecnológico. Las primeras tienen su origen en los altos costos de inversión de estos sistemas en comparación con el sistema convencional de riego por gravedad y la segunda razón es la falta de un soporte técnico infalible que permita al productor garantizar su inversión y recuperarla en un tiempo razonable, sin poner en riesgo su dinero ni propiedades. El presente manuscrito se centrará en analizar el sistema de fertirrigación desde una perspectiva técnica, dando las herramientas fundamentales para explotar rentablemente estos sistemas. Por razones de tiempo nos centraremos solamente en los sistemas de fertirrigación a cielo abierto y se mencionará en forma muy general las características de los sistemas de producción en invernadero.

Ventajas potenciales de los sistemas de fertirrigación

- Se consigue una alta eficiencia en el uso del agua y fertilizantes.
- Se mantiene un nivel de humedad en el suelo muy uniforme y a un nivel óptimo, sin que la planta sufra agobio hídrico.
- Se aumentan sustancialmente los rendimientos y se mejora la calidad de la cosecha.
- Se controla la concentración de nutrientes en la solución de suelo a voluntad.
- Se aplican los fertilizantes y otros agroquímicos prácticamente conforme la planta los requiere.
- Los nutrimentos se aplican en un sitio muy cercano a la raíz para que la planta los tome sin problema, reduciendo así los riesgos de fijación química y pérdidas por percolación.
- No interfiere con las operaciones de campo y el terreno se puede trabajar aun en el momento de estar regando.
- Se tiene un mejor control de malezas.

Tabla 1. Consumo de agua en el ámbito mundial durante los últimos 100 años y tipos de uso. (Los datos del 2020 son proyectados a partir de los años previos, Biswas 1996, citado por Echávez, 1998).

* Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Apto. 112 Celaya, Gto., 38.000 México.

Tipo de Uso	1900	1920	1940	1960	1980	2000*	2020*
	-----km ³ /por año-----						
Doméstico	-	-	-	30	250	500	(850)
Industrial	30	45	100	350	750	1,350	(1900)
Agrícola	500	705	1,000	1580	2,400	3,600	(4,300)
Total	530	750	1,100	1,960	3,400	5,450	(7,500)

Tabla 2. Sistema de producción de tomate, su rendimiento potencial, volumen de agua consumida y su eficiencia de uso (Fuentes varias).

Sistema de producción	Rendimiento t/ha	Consumo de agua Miles de m ³ /ha	Eficiencia de uso kg/m ³ de Agua	Costo Inversión, US Dolls/ha
Riego de Gravedad	50	15,000	3.3	0
Fertirrigación a campo abierto	100	8,000	12.5	2,500
Invernadero Almería, España	250	7,000	35.7	250,000
Invernadero (Holanda)	600	7,500	80.0	500,000

- Se reducen los riesgos de compactación del suelo por el paso de maquinaria en condiciones de alta humedad.
- Se reducen los costos de operación del riego.
- Se reducen la incidencia de enfermedades radiculares debido al mejor control del riego.

Desventajas de los sistemas de fertirrigación

- Se requiere una alta inversión inicial.
- Se requiere utilizar fertilizantes solubles que suelen ser mas costosos.
- Su operación requieren de cierto nivel tecnológico que a veces no tiene el productor.

Componentes básicos de un sistema básico de Fertirrigación

Un sistema de fertirrigación consiste de un cabezal de riego, el cual consta de una bomba, un medidor volumétrico del agua, un conjunto de válvulas que garantizan la operatividad, distribución del agua, expulsión de aire y seguridad del sistema en términos de protección ambiental (Válvula “check” que evita el retorno de agua contaminada con agroquímicos al pozo de extracción), un sistema de filtración, un sistema de regulación de la presión, un sistema de tanques de almacén de fertilizantes en solución, un sistema de inyección de los fertilizantes y otros agroquímicos, tubería de distribución del agua, y cinta o manguera con los emisores de

riego. Los sistemas mas avanzados disponen también de un automatismo que permite aplicar el agua y fertilizantes en forma automatizada a cada sector mediante el uso de una computadora u ordenador y una serie de electroválvulas en cada sector de riego. En el curso que nos ocupa nos centraremos en los sistemas de riego por goteo por ser los mas importantes y los de mayor potencial en el futuro.

Aspectos básicos del manejo del agua

Los sistemas de riego por goteo permiten aplicar el agua justo cuando se requiere en las precisas cantidades en que se requiere, de manera que el cultivo no debe sufrir agobio hídrico ni falta de oxígeno por riegos excesivos. Esta es una de las causas por las que estos sistemas expresan un alto potencial de rendimiento. Por otro lado estos sistemas utilizan acolchado plástico lo que ayuda aún mas a ahorrar agua al minimizar la evaporación. Existen dos enfoques para calendarizar el riego por goteo: Uno basado en la estimación de la evapotranspiración (E_t) o pérdida de agua del suelo y el cultivo y otro basado en la humedad del suelo.

Estimación de la evapotranspiración

Las variables ambientales que afectan la evapotranspiración son la radiación solar, la temperatura

del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. Estas variables interactúan entre sí para influenciar la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. Históricamente el procedimiento más comúnmente usado para integrar estas variables y estimar la evapotranspiración es el uso de un tanque evaporímetro clase A. En este tanque se mide la evaporación diaria en términos de profundidad. Este valor es siempre más alto que la evapotranspiración, sin embargo es un valor relacionado con la demanda de agua diaria, solo que este valor se debe asociar a un factor conocido como K_c o factor de cultivo. Este factor depende del estado de desarrollo del cultivo de la variedad, de las condiciones climáticas y del sistema de riego. La evapotranspiración también se puede estimar a partir de la E_{t_0} y de la estimación media del dosel del cultivo. En la figura 1 se presenta un ejemplo de este procedimiento para apoyarse en los resultados del tanque evaporímetro durante el cálculo de la evapotranspiración diaria.

Existen modelos muy completos para estimar la E_{t_0} mediante estaciones climatológicas especializadas. Estos modelos deben ser validados para cada región y cultivo y a partir de allí se pueden usar con mucha confianza, evitando así la necesidad de usar otros aparatos para monitorear la humedad del suelo. Una vez estimada correctamente la evapotranspiración se estima un factor de eficiencia de aplicación, que puede variar de un 95 a un 85%, pues nunca la eficiencia de aplicación del agua llegará al 100%.

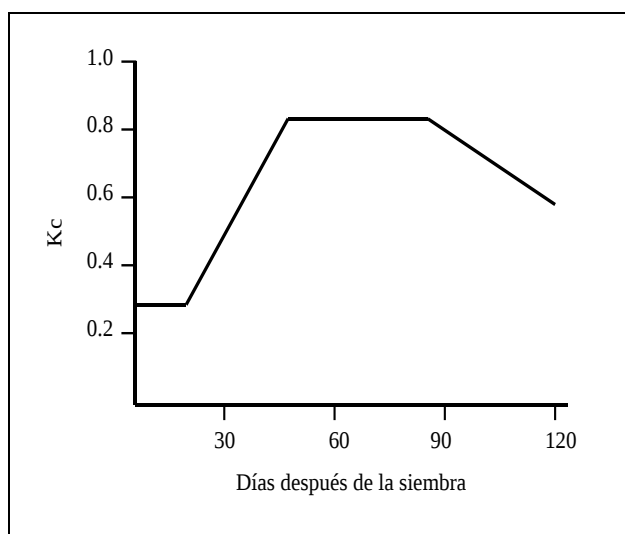


Figura 1. Coeficiente de cultivo (K_c) para calcular la lámina de evapotranspiración diaria para el cultivo de brócoli en Guajalato.

Manejo del agua en base al uso de tensiómetros

Esta estrategia de manejo del riego se basa en mantener un nivel de humedad en el suelo mediante el uso de un medidor de la tensión que consiste en una cápsula porosa acoplada a un tubo lleno de agua con un dispositivo para medir el vacío que se genera al moverse el agua hacia afuera de la cápsula porosa. Este dispositivo mide la tensión en bares y normalmente trabaja entre 0 y 0.7 bares o 70 centibares, cero cuando está saturado y aumenta a medida de que el suelo pierde humedad. El tensiómetro se coloca en la zona de mayor actividad radicular.

En estudios realizados en el Campo Experimental Bajío del INIFAP-México se ha evaluado el efecto de la posición de colocación de los tensiómetros y se observa una variación importante en función del sitio de colocación del mismo. En nuestra experiencia el tensiómetro debe colocarse a una distancia de 15 cm de la cintilla y a 15, 30 y 45 cm de profundidad. En condiciones de un número limitado de tensiómetros utilizar solo el de 30 cm de profundidad. El tensiómetro se utiliza durante los primeros estadios y el tensiómetro de mayor profundidad (45 cm) ayuda a evitar que el bulbo de humedad se vaya secando, al mismo tiempo, indica si se están aplicando riegos en exceso, lo que provocarían lixiviación de nitrógeno y condiciones anaeróbicas inconvenientes para el sistema radicular del cultivo. El tensiómetro de 45 cm deberá mantenerse entre 10-15 cbs de tensión.

Cada riego debe impactar ligeramente este tensiómetro. Cada suelo y cultivo requiere un nivel de tensión determinado. En la Tabla 3 se presenta la humedad disponible por cada 30 cm de profundidad y la tensión de humedad a capacidad de campo, así como la tensión al agotamiento del 15% de humedad aprovechable.

En los suelos arenosos de Arizona, Thompson (1997) recomienda manejar tensiones objetivo para los cultivos hortícolas, las cuales son: Sandía 7-9 cb; Lechuga de hoja 6-8 cb, espinaca 7-9 cb, mostaza 6-10 cb, brócoli 8-12 cb y coliflor 10-12 cb.

Tabla 3. Humedad disponible y niveles de tensión en el suelo a capacidad de campo y al 15 % de abatimiento de humedad en el suelo.

Textura del Suelo	Humedad Disponible a Capacidad de Campo	Potencial Cap. de Campo	Matricial, cb 15% Abat. Humedad
Franca	2.5-4.5 cm/30 cm prof.	12-18	20-25
Arcillosa	4.5-5.5 cm/30 cm prof.	15-25	25-30
Arena	1.2-2.5 cm/30 cm prof.	8-12	15-20

La estrategia de manejo del agua en Arizona consiste en tratar de que la tensión no fluctúe fuera del rango mencionado realizando riegos frecuentes, y en casos necesarios de varios riegos diarios. En los suelos arcillosos del Bajío Guanajuatense en México, el criterio que se sigue es sobre la base de tensiómetros aplicando el riego cuando los tensiómetros llegan a unos 25 cb, reponiendo la lamina evapotranspirada. Se inicia con riegos cada 5-7 días y se termina con riegos diarios o cada dos días, dependiendo del cultivo y de la estación de crecimiento. Normalmente no se manejan riegos superiores a los 100 m³/ha por evento, cuando se riega un día sí y otro no. En la etapa de alta demanda, cuando no es conveniente regar cada dos días debido al agobio que se genera, se prefiere dar un riego diario de 60 m³. El volumen preciso de riego es el resultado del aprendizaje del usuario durante la práctica, de acuerdo a las características texturales del suelo y cultivo, pero deberá estar cercano a las cifras que aquí se mencionan.

Frecuencia de riego

La frecuencia de riego depende del nivel de abatimiento de humedad que se decide dar al cultivo entre cada riego. En sistemas de riego por goteo se recomienda no ir mas allá del 20% de abatimiento de la humedad, lo que en términos de tensión significan unos 15-25 cbs para los suelos arenosos y arcillosos respectivamente. Es conveniente no aplicar un volumen mayor de 120 m³/ha en un solo evento. Esto es con el fin de evitar acumulaciones excesivas de humedad que puedan causar condiciones apropiadas para los hongos fitopatógenos. Por otro lado láminas altas pueden ocasionar la lixiviación de nitratos y arrastre fuera del alcance radicular con el riesgo de contaminar los mantos acuíferos. La frecuencia de riego dependerá del estado de desarrollo del cultivo, de tal manera que al inicio se darán frecuencias bajas de riego de hasta una semana o más días y al final se darán posiblemente riegos diarios si la Et₀ y el dosel del cultivo son muy altos.

Riego de establecimiento

El riego inicial también conocido como riego de asiento es el que va a permitir que el cultivo se establezca. Este riego se calcula en términos del volumen de suelo que se va a llevar a capacidad de campo, es decir de las dimensiones del bulbo de humedad, el cual normalmente tiene una profundidad de 50 cm y un ancho en la parte superior de unos 50 cm. Esto de una sección de 0.098 m² por surco. Asumiendo una surquería de 1m de ancho, entonces tendríamos 10,000 m de longitud de surco en una ha x 0.098 m² = 980 m³ de suelo a humedecer. En términos de lamina de riego, si este suelo tiene una densidad aparente de 1.2m³/t y un 5% de humedad al momento de iniciar el riego y lo vamos a llevar a capacidad de campo (45% de humedad), entonces: $0.45 - 0.05 = 0.40 \text{ t/m}^3 \times 1.2 \text{ m}^3/\text{ton} \times 980 \text{ m}^3 = 470 \text{ m}^3$ de agua en el riego de arranque o asiento. Si el gasto de la cinta de goteo es de 3 l/m/hora, entonces se requiere dar un riego de 15.6 horas para formar el bulbo de humedad. La lamina de riego dependerá de las dimensiones del bulbo de humedad que deseamos, del nivel de humedad del suelo al momento de inicio del riego y de la capacidad de campo del suelo.

Una vez transplantado se da un riego de sello de unos 40 m³ con fertilizante a una concentración de no mas de 200-250 ppm de N, es decir una dosis de 8-10 kg de N/ha (Fuente: Nitrato de amonio), diluidos en el volumen de 40-50 m³ del “riego de sello”. De esta manera se asegura un buen desarrollo inicial de la planta. Una vez que la planta se afianza, en el terreno, lo cual debe ocurrir en unos 2-3 días se debe de suspender el riego por unos 5-10 días para forzar a la plana a profundizar su desarrollo radicular. Sin embargo cada especie y condición climática responde de manera distinta y se deberá usar el criterio del técnico para decidir si sigue aplicando láminas pequeñas hasta que la planta se afianza en el sitio. Es importante recordar que si se le dan riegos excesivos e innecesarios al establecimiento, la planta puedes agobiarse por falta de oxígeno. Una vez establecida la planta, el siguiente riego también será distanciando unos 5-7 días para conseguir el mismo fin.. Para decidir cuando regar se utiliza el criterio de los tensiómetros o el de la Et₀, si es que se tiene información generada en la región. Si se utilizan tensiometros

se recomienda utilizar el criterio de riego del cuadro 3. Las lecturas de los tensiómetros deberán ser en la mañana de 7 a 9 AM y se anotarán en una bitácora para llevar el récord de humedad del suelo.

Manejo del riego en cultivos sensibles al agobio hídrico

Hay cultivos que son muy sensibles a falta de agua, tal es el caso de los tomates y el apio. Estos cultivos tienen una alta demanda de calcio y el cual entra a la planta por flujo de masa. Cuando se reduce el abastecimiento de agua en tomates por debajo de cierto nivel, particularmente cuando los tomates tienen un tamaño de una pulgada, se puede provocar el síndrome de pudrición apical por falta de calcio. Esto ocurre aun cuando se este suministrando calcio al cultivo, pues la deficiencia se genera debido a la falta de agua para que se realice el flujo de calcio hacia la raíz. Este problema también suelo presentarse en Chile. Por otro lado en el caso de apio, el síntoma que causa el agobio hídrico es corazón negro. En estos cultivos posiblemente no conviene secar el bulbo mas allá de los 20-25 cb en suelos arcillosos y no mas de 15 cb en suelos arenosos.

Calidad del agua de riego

El agua para fertirrigación se evalúa desde dos puntos de vistas:

- El riesgo de obstrucción de emisores, y
- El efecto nocivo sobre el cultivo.

Riesgo de obstrucción de emisores.

En la Tabla 4 se indican los parámetros de calidad del agua para fines de fertirrigación, teniendo en cuenta el riesgo de taponamiento de emisores.

Para la eliminación de los sólidos se utilizan filtros de malla y arena y de esta manera se evita la obstrucción de los emisores por esta vía. El pH es el resultado de la presencia de bicarbonatos y si el pH es muy alcalino también de carbonatos, los cuales se eliminan mediante la presencia de ácido sulfúrico o nítrico. Este último tiene la ventaja de no adicionar mas salinidad al agua, puesto que el ion acompañante del protón es un nutrimento, sin embargo es altamente corrosivo y de mayor riesgo en su uso que el sulfúrico. Normalmente la adición de ácidos se realiza hasta que el agua consigue un pH

Tabla 5. Criterio e Indices de Clasificación del agua de Riego* (Acevez, 1979).

de 5.5 a 6.0 para eliminar la mayoría de los bicarbonatos. Las sales solubles no pueden ser eliminadas por un procedimiento económico, por lo que hay que aprender a convivir con ellas. Las bacterias son eliminadas mediante hipoclorito de sodio a una concentración baja.

Tabla 4. Riesgo de taponamiento de emisores debido a características del agua (Ayers y Wescot, 1985).

Tipo de problema		Grado de restricción en el uso del agua		
		Leve	Moderado	Severo
Sólidos	suspendidos	< 50	50-100	>100
	(mg/l)			
PH		<7	7-8	>8
Sales solubles, dS/m		<0.7	0.7 -3.0	>3.0
Manganeso (mg/l)		<0.1	0.1-1.5	>1.5
Fierro (mg/l)		<0.1	0.1-1.5	>1.5
H ₂ S (mg/l)		<0.5	0.5-2.0	>2.0
Dureza*		<150	150-300	>300
Bacterias		>10,000	10,000-50,000	>50,000
*Dureza=50(Ca+Mg), concentraciones de Ca y Mg en meq/l.				

Aspectos de calidad del agua para uso agrícola

En la calidad del agua para uso agrícola son tres los aspectos a considerar: 1) La presencia de sales solubles, 2) la sodicidad y la presencia de iones tóxicos. En la Tabla 5 se presentan los criterios de clasificación del agua en base a estos parámetros. Estos criterios se desarrollaron para predecir los efectos del uso del agua sobre el cultivo. Los parámetros generales para interpretar los resultados de calidad del agua se presentan en la Tabla 6.

Las dos variables de mayor importancia en el agua para uso agrícola son su contenido de sales y su contenido de sodio. Una vez determinado esto se observa la presencia de iones específicos: cloro y boro.

Es importante tomar en cuenta que cada cultivo puede responder en forma diferente a los factores limitantes indicados en la Tabla 6, por lo que el cultivo a establecer es un complemento a considerar al interpretar los análisis de calidad del agua. El agua de riego es también una fuente de nutrimentos al cultivo al momento de planear los programas de fertirrigación. En la Tabla 7 se presenta el contenido

Criterio	Índice	Abreviatura
1.- Sales Solubles	Conductividad Eléctrica	C:E
	Salinidad Efectiva	S.E
	Salinidad Potencial	S.P
2.- Sodicidad	Relación de Adsorción de Sodio	RAS
	Relación de Adsorción de Sodio Ajustado	RAS aj
	Carbonato de Sodio Residual	CRS
	% Sodio Posible	PSP
3.- Iones Tóxicos	Boro	B
	Cloro	Cl

Tabla 6. Guía general para la interpretación de la calidad del agua para uso agrícola (Ayers y Wescot, 1995).

Limitante General	Unidades	Sin problema	Problema Moderado	Problema Severo
Salinidad	CEe (dS/m)	<0.7	0.7-3.0	>3.0
Sodicidad	RAS	<3	3-9	>9
Carb. Sodio Resid*.	Relación	<1.2	1.2-2.5	>2.5
Bicarbonatos*	meq/l	<1	1-8	>8
Cloruros	meq/l	<4	4-10	>10
Boro	mg/l	<0.7	0.7-3.0	>3

*Los bicarbonatos se pueden destruir con ácido sulfúrico o nítrico y eliminar estas limitantes.

de cada uno de los cationes y aniones que tiene el agua de riego por cada meq/l y la cantidad total que se adiciona al suelo en una lámina de 50 cm de riego.

Tabla 7. Cantidades de nutrientes contenidos en cada metro cúbico de agua conteniendo un meq/l y el aporte global al cultivo mediante una lamina total de riego de 50 cm (Castellanos, 1997) .

Nutrimiento	g/m ³	kg de nutrimento/ha en 50 cm de lámina
Ca	40.0	101
Mg	12.2	62
K	39.1	198
N-NO ₃	14	70
S-SO ₄	16	80

Aspectos básicos del manejo de la Fertilización

Para la elaboración de los programas de fertirrigación lo primera que se debe conocer son las características de la fertilidad del suelo y de potenciales condiciones limitativas de física de suelos.

El análisis de suelo.

Los análisis de suelo nos indican si el suelo presenta problemas de sodio y requiere de la adición de mejoradores tales como yeso agrícola, azufre o ácido sulfúrico; si tiene problemas de sales y requiere lavado con agua de buena calidad; si presenta condiciones de acidez y requiere de la adición de cal. Por otro lado nos indica los niveles de N-NO₃, fósforo, Potasio, Magnesio, para definir las dosis requeridas de estos macronutrientes. También nos indica si presenta condiciones limitativas de microelementos, tales como Fe, Cu, Zn, Mn o Boro. En tal caso en ocasiones es conveniente adicionar estos micronutrientes desde la fertilización de fondo y estar prevenidos con el fertilizante foliar o para ser aplicado por el sistema si su condición química lo permite.

En la Tabla 8 se presentan los niveles críticos de los principales nutrimentos en el suelo de acuerdo al procedimiento analítico. Es importante recalcar que cada cultivo responde en forma diferente y que además debe de tomarse en cuenta le meta de rendimiento para definir con precisión la dosis de fertilización a aplicar.

Curva de demanda de nutrimentos

La demanda de nutrimentos del cultivo se obtiene a partir de muestreos de biomasa y análisis nutricional a lo largo del ciclo del cultivo. Con estos datos se calcula la demanda diaria para una condición dada. Es importante recordar que en los sistemas de fertirrigación las curvas de demanda se deben preparar bajo la condición de que el cultivo no tenga ninguna restricción, pues precisamente lo que se desea es que el cultivo exprese todo su potencial de rendimiento. Para mostrar un ejemplo de ello en la Tabla 9 se presenta la acumulación nutricional y de biomasa total en el cultivo de brócoli bajo las condiciones del Guanajuato, México. A

partir de estos datos se calcularon los datos de demanda diaria de la Tabla 10.

Preparación de los programas de fertirrigación

La mayoría de estos nutrimentos los suministra el suelo, a menos de que el contenido de estos este por debajo del nivel crítico indicado en el cuadro 8 en cuyo caso será necesario suministrar el nutriente limitativo. Prácticamente en todos los caso se requiere aplicar nitrógeno, pues este elemento se encuentra en concentraciones insuficientes en la mayor parte de los suelos.

Tabla 8. Niveles críticos de los principales nutrimentos del suelo de acuerdo al procedimiento de análisis.

Nutrimento	Procedimiento de Análisis	Nivel crítico, ppm
Fósforo	Bray-1	20-30
Potasio	Olsen	12-18
Fierro	NH ₄ -Ac	250-350
Cobre	DTPA	5.0
Zinc	DTPA	0.5
Manganeso	DTPA	1.0
Boro	DTPA	5.0
Azufre	Agua caliente	0.5
Molibdeno		8-12
	Oxalato Acido de monio	0.1-0.2

El caso del nitrógeno se juzga a partir de la demanda del cultivo y de la cantidad total de N-NO₃ disponible en el suelo.

Tabla 9. Acumulación de materia seca y nutrimentos (kg/ha) en brócoli cv. Legacy en Celaya, Gto, México (Datos sin publicar Castellanos, 1998).

DDT	Etapas Fenológica	Materia seca	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg
		-----kg/ha-----					
0	Trasplante	0	0	0	0	0	0
28	4-6 hojas	663	33	10	45	21	4
42	8-12 hojas	2178	106	31	127	58	11
62	IB	5966	187	55	296	200	16
70	DF	8334	242	72	404	215	19
81	PC	9091	276	79	426	259	24
94	FC	9470	246	88	435	245	23

DDT=Días después del trasplante IB=Inicio de botoneo DF=Desarrollo del florete PC=Precosecha FC= Finalización de cosecha

Tabla 10. Tasa de acumulación de materia seca y nutrimentos (kg/ha/día) en brócoli cv. Legacy durante su ciclo de cultivo en Celaya, Gto, México (Datos sin publicar, Castellanos, 1998).

--	--	--	--	--	--	--	--

DDT	Etapas Fenológica	Materia seca	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg
		-----	-----	kg/ha/día-----	-----	-----	-----
0-28	4-6 hojas	23.7	1.2	0.4	1.6	0.8	0.1
28-42	6-12 hojas	108.2	5.2	1.5	5.9	2.6	0.5
42-62	12 hojas-IB	189.4	4.1	1.2	8.5	7.1	0.3
62-70	IB DF	296.0	6.9	2.1	13.5	7.5	0.4
70-81	DF-PC	68.8	3.1	0.6	2.0	4.0	0.5
81-94	PC-FC	29.2	-----	0.7	0.7	-----	-----

DDT = Días después del trasplante IB = Inicio de botoneo DF = Desarrollo del florete PC = Precosecha FC = Finalización de cosecha

Tabla 11. Requerimientos de nitrógeno en la fertirrigación de varios cultivos hortícolas (Hart, 1994).

Cultivo	Estadio fenológico	Demanda diaria, kg/ha
Brócoli	Desarrollo temprano	1.0-2.5
	Mediados de Estación	3.5-5.0
	Formación de botón	5.0-7.0
	Desarrollo de cabeza	4.0-6.0
Pepino	Crecimiento vegetativo	1.0-1.5
	Floración-Cuajado	1.5-3.5
	Desarrollo de fruto	2.0-2.5
	Primera cosecha	0.8-1.6
Lechuga	Desarrollo temprano	1.0-1.7
	Formación de copa	1.5-3.5
	Llenado de cabeza	2.5-5.0
Melón	Desarrollo vegetativo	1.0-1.5
	Floración/cuajado	2.0-3.5
	Desarrollo de fruto	2.0-2.5
	Primer cosecha	1.0-1.5
Pimiento	Desarrollo vegetativo	1.0-1.6
	Floración temprana	2.5-3.5
	Desarrollo del fruto	3.5-4.0
	Primer cosecha	1.0-1.6
Calabacita	Desarrollo vegetativo	1.0-1.6
	Floración/cuajado	1.6-3.5
	Primer cosecha	1.0-1.6
Tomate	Desarrollo vegetativo	1-1.6
	Floración cuajado	2.5-3.5
	Desarrollo del fruto	1.5-2.5
	Primera cosecha	1-1.5

En ausencia de curvas de demanda regionales se pueden utilizar los datos de la Tabla 11 como un

indicador de las necesidades de fertilización nitrogenada de las principales hortalizas.

Fertilización de fondo

La fertilización de fondo es recomendable para el caso del fósforo, que es un nutriente poco móvil y en caso necesario para el potasio. Se recomienda aplicar del 50-60 % del fósforo, y si el suelo no presenta problemas de fijación se puede aplicar la totalidad de este nutrimento. Si se detecta deficiencia de Zinc en el análisis de suelo, se puede aplicar una dosis baja de este elemento en la fertilización de fondo. En algunas ocasiones se recomienda la aplicación de una dosis baja de nitrógeno utilizando la fuente de sulfato de amonio para evitar lixiviación durante el riego de establecimiento o de formación del bulbo y debido a que las plántulas en estadios muy tempranos tienen limitada la actividad de la enzima nitrato reductasa. En este caso se sugiere no aplicar más de 30 kg de N/ha.

Fertilizantes solubles

Los fertilizantes para uso en fertirrigación deben de tener un buen grado de pureza para evitar el taponeamiento de emisores. Es importante recalcar que la misma fuente viene en varias presentaciones: a) Para aplicación al suelo, en cuyo caso viene recubierta de cera y b) Para fertirrigación, el cual

se presenta sin la cera. Cuando se usa la fuente con cera debe primeramente eliminarse antes de su inyección, la cual se va a la superficie, antes de preparar la solución madre. Esta cera puede tapar los emisores y generar algunos problemas en el proceso de filtrado. En la Tabla 12 se presenta la lista más usada de fertilizantes en fertirrigación y su solubilidad.

Micronutrientes

Existen dos formas de aplicar micronutrientes en el sistema de fertirrigación: en forma inorgánica u orgánica. La primera son los sulfatos, los cuales son fácilmente precipitados a pH neutros o alcalinos, mientras que los orgánicos o quelatos son más estables. Cuando se requiere hacer una corrección el Fe-EDTA se aplica a pH menores a 6.0 y a dosis de 50 g/m³, el Fe-DTPA se aplica a pH menor de 7.0 a dosis de 25 cc/m³ (de la presentación en solución al 6%), el Fe-EDDHA se aplica a dosis de 35 g/m³, evitando que el pH sea menor de 4.0. Estas aplicaciones se realizan conforme el cultivo lo requiera cada una o dos semanas. Las aplicaciones de Mn o Zn EDTA, o DTPA se aplican a dosis de 3.5 g/m³ y las de cobre a dosis de 2.5 g/m³.

Tabla 12. Fertilizantes más usados en fertirrigación, contenidos nutrimentales y su solubilidad a 20° C.

Fertilizante	Concentraciones: N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-Varios	Solubilidad, g/l
Nitrato de calcio 4 H ₂ O	15.5-0-0-26.6 (CaO)	1,200
Nitrato de amonio	33.5-0-0	1,700
Sulfato de amonio	21-0-0-22 (S)	500
Urea	46-0-0	500
Nitrato de potasio	13-0-46	100-150
Sulfato de potasio	0-0-50-18 (S)	110
Fosfato monopotásico	0-52-33	200
Fosfato monoamónico	12-60-0	200
Sulfato magnésico 7 H ₂ O	16 (MgO)-13 (S)	700
Fosfato de urea	17-44-0	150
Nitrato magnésico 6 H ₂ O	11-0-0-0-9.5 (Mg)	500

Compatibilidad de los fertilizantes

Burt (1994) sugiere una serie de reglas para el mezclado de fertilizantes, las cuales se enlistan a continuación:

1. Cuando se mezclen fertilizantes sólidos, llenar los tanques al 50-75 % del agua requerida en la mezcla.
2. Siempre agregar el fertilizante líquido al agua en el tanque de mezclado antes de agregar el fertilizante sólido, el agua adicional puede

proveer de calor a la mezcla en caso de que los fertilizantes produzcan enfriamiento a la mezcla.

3. Agregue siempre el fertilizante poco a poco a la mezcla agitando continuamente para prevenir la formación de grumos.
4. Siempre agregue el **ácido al agua y nunca el agua al ácido**.
5. Cuando adicione cloro al agua en la forma de cloro gaseoso, siempre agregue el cloro al agua y nunca viceversa.

6. Nunca mezcle ácidos o soluciones ácidas con cloro, ya sea este en la forma de gas o líquido, tal como hipoclorito de sodio. Se formará el gas cloro (altamente tóxico). Nunca almacene cloro y ácido en el mismo cuarto.
7. Nunca intente mezclar directamente amoníaco anhidro y ácido, la reacción es violenta e inmediata.
8. Nunca intente mezclar un fertilizante líquido concentrado con otro fertilizante concentrado.
9. No intente mezclar un compuesto que contenga sulfato con otro que contenga calcio o magnesio.
10. Siempre revise en la etiqueta las indicaciones de solubilidad y compatibilidad.
11. Sea extremadamente cuidadoso en no mezclar soluciones de N-Phuric con la mayoría de los otros compuestos, en la mayoría de los casos son incompatibles.
12. Nunca mezcle fertilizantes que contengan fósforo con los que contengan calcio.
13. Agua extremadamente alta en calcio puede formar compuestos insolubles al mezclarse con fosfatos, polifosfatos, o sulfatos.
14. Siempre realice la prueba de la jarra, para verificar compatibilidades y riesgos de precipitados insolubles antes de inyectar una mezcla desconocida en el sistema de riego.

Taponamiento de emisores

Los goteros pueden taparse debido a partículas físicas, carbonatos, materia orgánica, bacterias o algas. Las partículas físicas deben separarse con un filtro de mallas de una finura al menos 10 veces menor que la salida del emisor. Los bicarbonatos y carbonatos se deben eliminar mediante la adición de ácido al agua hasta conseguir un pH de 5.5 a 6. La materia orgánica se elimina con filtros de arena y las bacterias y algas con el uso de cloro. El cloro a bajas concentraciones (de 1 ppm) funciona como biocida y a altas concentraciones (mayores de 100 ppm) actúa como agente oxidante. Para que el cloro actúe es necesario que el pH se mantenga menor a 7, pues aumenta la concentración de ácido hipocloroso sobre la de hipoclorito. Siendo el primero 40-80 veces mas efectivo que el segundo como agente oxidante. Por otro lado el cloro libre reacciona con sustancias que se oxidan produciendo compuestos insolubles de Fe, Mn, H₂S, por lo que la cloración es también de utilidad para tratar otros problemas además de los bacteriales. Los compuestos comerciales que se pueden manejar como oxidantes para mantener los emisores en

buen estado son: Cloro gaseoso, Hipoclorito de sodio (NaOCl), Hipoclorito de Calcio [Ca(OCl)₂], aunque este último tiene algunos riesgos de precipitación de Ca, si la concentración de Ca en el agua es mayor de 20 ppm o la temperatura de esta es baja.

Uso de soluciones nutritivas completas

En ocasiones la fertirrigación se realiza en sustrato sin suelo en cuyo caso se agrega una solución nutritiva completa. Esta solución nutritiva se prepara a partir de dos soluciones madre: A y B. En las Tablas 13, 14 y 15 se presentan las indicaciones para preparar una solución nutritiva. Cada cultivo tiene sus propios requerimientos, así que esta se considera solo como una solución nutritiva general.

Tabla 13. Solución A.

Material	g/l
Nitrato de Potasio (KNO ₃)	50.3
Fosfato de potasio (KH ₂ PO ₄)	28.8
Sulfato de Magnesio (MgSO ₄ 7 H ₂ O)	50.3
Solución de micronutrientes	100 cc

Tabla 14. Solución de micronutrientes

Material	g/l
Acido Bórico (H ₃ BO ₃)	0.28
Sulfato de manganeso (MnSO ₄ H ₂ O)	0.15
Sulfato de Zinc (ZnSO ₄ 7H ₂ O)	0.02
Sulfato de cobre (Cu SO ₄ 5H ₂ O)	0.05
Acido Molíbdico (H ₂ MoO ₄ H ₂ O)	0.03

Tabla 15. Solución B.

Material	g/l
Nitrato de Calcio Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O (GF)	107.9
Fe-DTPA	4.8

Para inyectar la solución nutritiva completa se mezclan iguales partes de A y B y se diluye a un litro de A+B en 100 o 200 l de agua, dependiendo del cultivo.

En la Tabla 16 se presentan los niveles recomendados de cada macronutriente de acuerdo al cultivo.

Tabla 16. Concentración de nutrimentos en la solución nutritiva para varios cultivos en invernadero.

Cultivo	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio
Pepino	230	40	315	175	42
Eggplant	175	39	235	150	28
Lechuga	200	50	300	200	65
Melón	186	39	235	180	25
Pimiento	175	39	235	150	28
Tomate	200	50	360	185	45

BIBLIOGRAFIA

- Abbott, J.S. 1988. Microirrigation-World wide usage. Report by microirrigation working group. ICID Bul. 37, No 1:1-12.
- Aceves, E. 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Posgraduados. 382 p.
- Ayers, R.S. y D.W. Westcot. 1985. Water Quality for Agriculture. Irrigation and Drainage Paper. No 29. FAO, Roma.
- Burt, C., K. O Connor y T. Ruehr. 1995. Fertigation. ITRC. San Luis Obispo, Ca. 295 p.
- Echavez, G. 1998. Sistema de Riego presurizado de baja carga para el desarrollo rural. En: Memorias del 3er Simposio Internacional de Fertirrigación. P. 121-130. León, Gto, México.
- Castellanos, J.Z. 1987. Las curvas de acumulación nutrimental en los cultivos hortícolas y su importancia en los programas de fertirrigación. En: Memorias del 2º Simposio Internacional de Fertirrigación. Qro. México. p. 73-82.
- Echavez, G. 1998. Sistema de Riego presurizado de baja carga para el desarrollo rural. En: Memorias del 3er Simposio Internacional de Fertirrigación. P. 121-130. León, Gto, México.
- Hart, T. 1994. Drip irrigation and fertigation management of vegetable crops. California Dept. of Food and Agriculture. Sacramento, Ca. 19 p.
- Thompson, T.L. 1987. Fertigation of Vegetable crops: The Arizona Experience. En: Memorias del 2º Simposio Internacional de Fertirrigación. Qro. México. p. 83-90.

EL SEGUIMIENTO DE LA NUTRICION DEL CULTIVO EN LOS SISTEMAS DE FERTIRRIGACION

J.Z. Castellanos*

INTRODUCCION

Las tres premisas fundamentales para optimizar la nutrición del cultivo en los sistemas de fertirrigación son: 1) Análisis del suelo y agua, previo al establecimiento del cultivo, 2) Conocimiento de la demanda nutrimental del cultivo a través del ciclo fenológico (para maximizar rendimiento y calidad) y 3) Monitoreo de la nutrición del cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento. El análisis de suelo establece el grado de abastecimiento de nutrimentos que puede proporcionar el suelo. Por lo tanto, los resultados del análisis de suelo y el conocimiento de la demanda nutrimental para cada etapa fenológica son la base para preparar los programas de fertirrigación en los cultivos. Estos programas se ajustan o corrigen sobre la marcha, en base a los análisis foliares, de solución del suelo y de extracto celular de pecíolo.

ELABORACION DE LOS PROGRAMAS DE FERTIRRIGACION

Los programas de fertirrigación se basan en la demanda nutrimental de acuerdo a la etapa fenológica. Esta variable se determina mediante muestreo de biomasa total secuencial. Es decir que se toman muestras del cultivo total en una superficie determinada, que puede ser de dos o tres metros cuadrados. Estos muestreos se realizan cada dos o tres semanas, teniendo especial precaución de que sean representativos de la etapa de desarrollo del cultivo. Las muestras se secan, se pesan y se muelen para su análisis de laboratorio. Mediante el conocimiento de la materia seca total y el análisis químico de estas muestras vegetales se obtienen las curvas de acumulación para los macronutrimentos: N, P, K, Ca, Mg y S. Si el nutrimento se encuentra en el suelo en cantidades suficientes este no se aplica y si su concentración es baja entonces se aplica en las cantidades que previos estudios han determinado como suficiente, la cual no necesariamente corresponde a la demanda total.

Cada cultivo tiene diferentes demandas y otros aspectos además del rendimiento se toman en cuenta, tales como la calidad, la cual es particularmente importante en la mayoría de las solanáceas.

Los programas de fertirrigación se diseñan suministrando el nutrimento una o dos semanas antes de que la planta lo demande para asegurar que estará disponible. Existen dos estrategias para aplicar el fertilizante a través del sistema de riego: a) Aplicación diaria a través de una concentración determinada que se mide mediante la conductividad eléctrica y una relación de nutrientes y b) Aplicación semanal de acuerdo a la demanda, suministrando el nutrimento antes de su demanda.

Actualmente no hay suficiente investigación para determinar cual de los dos procedimientos es más eficiente. El INIFAP ha realizado investigación utilizando la estrategia de aplicación semanal y se han conseguido eficiencias de recuperación de nitrógeno del orden de 80 % con rendimientos muy elevados, lo cual es bastante bueno e indica que este sistema es una buena estrategia. Por otro lado algunos técnicos utilizan el sistema de aplicación diaria de fertilizantes a través de una relación nutrimental y controlada mediante automatismo en base a una conductividad eléctrica determinada. Esta estrategia suele utilizar una solución nutritiva completa y tiene su origen en los sistemas bajo invernadero en la Zona de Almería España, Holanda e Israel. Fue diseñado para cultivos sin suelo o a base de arena (Enarenado), por lo que lleva todos los nutrimentos. El sistema también funciona en términos de producción, pero es muy costoso y no tiene un fundamento racional, pues se aplican nutrimentos que el suelo suministra sin ningún problema lo que repercute en altos costos para el productor.

En un suelo fértil del orden de los vertisoles, en el Bajío Guanajuatense, México, se consiguieron rendimientos muy elevados en brócoli (25 t/ha), frijol (6.4 t/ha) y chile (75 t/ha), mediante el uso de nitrógeno solamente, sin necesidad de suministrar fósforo, potasio, ni elementos menores. En dicho suelo los niveles de fósforo y potasio resultaron altos y no hubo restricciones por elementos menores, por lo que la respuesta a fósforo y potasio fue nula. Esto no significa que todos los suelos se comporten así, sino solamente que hay que usar el análisis de suelo para definir que nutrimentos se aplican y a que dosis.

* Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Apto. 112 Celaya, Gto., 38.000 México.

METODOLOGIA PARA LA DEFINICION DE LOS NIVELES DE SUFICIENCIA NUTRIMENTAL

Existen varias estrategias para definir los niveles de suficiencia. En general todas ellas tienen algunas deficiencias, pues los niveles de suficiencia son afectadas por la velocidad de suministro nutrimental, la etapa fenológica, el órgano de muestreo (pecíolo u hoja), la posición de la hoja de muestreo, las condiciones de temperatura ambiental y humedad del suelo, la estación de crecimiento, así como también pueden ser afectadas por el genotipo e incluso por la hora de muestreo. Por tal razón no es posible que los niveles de suficiencia se determinen en un ciclo ni en un solo suelo. A veces la variación encontrada entre un sitio experimental y otro hace que los rangos reportados sean muy amplios. No obstante estas deficiencias la técnica de diagnóstico nutrimental es útil y suele ser un buen indicador siempre y cuando se tengan en cuenta los aspectos antes mencionados.

En la práctica existen dos aproximaciones para definir los niveles de suficiencia: Una que se basa en la relación entre el contenido nutrimental en el tejido vegetal y el crecimiento o el rendimiento y la otra que se obtiene a través de generar datos de una población grande de análisis, con la que se obtiene un histograma de frecuencias que generalmente obedece a una distribución normal. En dicha distribución normal se establece arbitrariamente que los niveles a la izquierda son bajos, a la derecha altos y los del medio son normales o medios. En ausencia de datos regionales esta técnica da al menos una idea aproximada para interpretar los resultados, sin embargo es muy imprecisa, pues el hecho de que los niveles sean bajos no significa que estén al nivel de deficiencia ni el que sean altos que sean excesivos. Por lo contrario la técnica que relaciona el nivel nutrimental con la condición de desarrollo del cultivo es más precisa. En la figura 1 se presenta la relación entre el contenido de nitratos en la hoja y el rendimiento de brócoli. Estos datos corresponden a resultados obtenidos en Celaya, Gto., México con la variedad Legacy de Brócoli.

Niveles de suficiencia Nutrimental en Brócoli

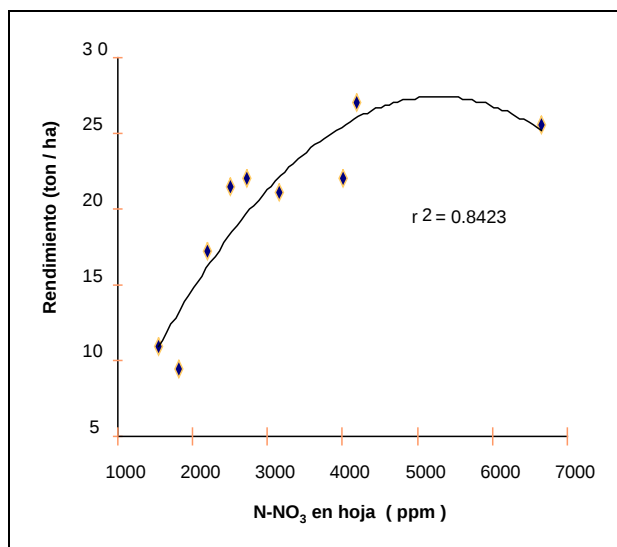


Figura 1. Relación entre el contenido de nitratos en la hoja y el rendimiento de brócoli.

Una vez iniciado el programa de fertirrigación se establece un programa de muestreos para asegurar la óptima nutrición del cultivo. Existen varias estrategias de muestreo: 1) Muestreo foliar, 2) muestreo de pecíolo para análisis de muestra seca y 3) Muestreo de pecíolo fresco para análisis de extracto celular (Incorrectamente denominado análisis de savia vegetal). Los niveles de suficiencia para diagnosticar la nutrición nitrogenada en este cultivo se presentan en la tabla 4. Estos fueron determinados en forma preliminar en tres órganos o componentes: Hoja completa, pecíolo seco y savia obtenida del pecíolo. Este tipo de experimento se realizó durante tres años en distintos suelos para determinar los valores de referencia nutrimental en el cultivo de brócoli en Guanajuato, México.

En las Tablas 1 a 5 se presentan los estándares de suficiencia de N para cinco etapas fenológicas del cultivo de brócoli en: 1) Hoja completa; 2) Pecíolo seco y 3) Extracto celular de pecíolo fresco. Estos valores pueden ser tomados como indicadores del estado de la nutrición nitrogenada de este cultivo. Fueron desarrollados para las condiciones del Bajío en México.

Tabla 1. Niveles preliminares de suficiencia de N, P, K, Ca y Mg generados en Hoja Completa para el cultivo de Brócoli, bajo las condiciones del Bajío (promedio de tres ciclos 96-97-98).

Etapa	N-Total %	N-NO ₃ ppm	P	Hoja Completa		
				K	Ca	Mg
				-----%-----		
6 hojas	5.5-6.5	8,000-11,000	0.50-0.80	3.5-6.0	2.0-3.5	0.40-0.50
12 hojas	5.5-6.5	6,000-8,000	0.50-0.80	3.5-6.5	2.2-3.5	0.26-0.50
Inicio de botoneo	5.5-6.5	3,500-6,000	0.45-0.80	3.0-5.0	1.1-3.5	0.20-0.45
Desarrollo del florete	5.5-6.0	3,000-5,000	0.45-0.80	3.0-4.7	1.1-2.5	0.20-0.30
Pre-cosecha	4.0-5.0	2,500-4,000	0.45-0.70	3.0-3.5	1.1-2.5	0.18-0.25
El muestreo se realizó en la hoja más recientemente madura .						

Tabla 2. Niveles preliminares de suficiencia de Fe, Cu, Mn y Zn generados en Hoja Completa para el cultivo de Brócoli, bajo las condiciones del Bajío (promedio de tres ciclos 96-97-98).

Etapa	Fe	Hoja Completa		
		Cu	Mn	Zn
		-----ppm-----		
6 hojas	60-250	3-10	50-150	30-60
12 hojas	60-250	3-10	50-130	30-60
Inicio de botoneo	60-250	3-10	30-60	25-60
Desarrollo del florete	60-240	3-10	30-60	25-60
Pre-cosecha	60-250	3-10	30-60	25-60
El muestreo se realizó en la hoja más recientemente madura.				

Tabla 3. Niveles preliminares de suficiencia de N, P y K generados en peciolo seco para el cultivo de Brócoli, bajo las condiciones del Bajío (promedio de tres ciclos 96-97-98).

Etapa	N-NO ₃ ppm	P-PO ₄	K
			-----%-----
6 hojas	15,000-20,000	0.42-0.53	6.5-9.2
12 hojas	8,000-18,000	0.35-0.51	6.5-9.0
Inicio de botoneo	5,500-13,000	0.30-0.48	3.4-5.3
Desarrollo del florete	5,000-8,000	0.30-0.45	3.0-5.0
Cosecha	2500-4,000	0.30-0.40	2.8-4.0
El muestreo se realizó en la hoja más recientemente madura.			

Tabla 4. Niveles preliminares de suficiencia de N, P, K, Ca y Mg generados en Extracto celular de peciolo del cultivo de Brócoli, bajo las condiciones del Bajío (promedio de tres ciclos 96-97-98) .

Etapa	N-NO ₃	P-PO ₄	K	Ca	Mg
	-----ppm-----				
6 hojas	1,500-2,000	130-200	4000-6500	340-480	170-200
12 hojas	1,000-1,900	120-200	3000-6000	300-500	100-350
Inicio de botoneo	800-1,500	100-120	2000-5500	250-700	100-350
Desarrollo del florete	700-1000	100-125	2500-4000	250-700	80-160
Cosecha	300-600	80-120	2200-4000	150-230	90-130
El muestreo se realizó en la hoja más reciente madura (4ta ó 5ta hoja).					

Tabla 5. Niveles encontrados de Fe, Cu, Mn y Zn en extracto celular de peciolo en el cultivo de Brócoli, bajo las condiciones del Bajío (Promedio de tres ciclos 96-97-98) (Versión Agosto, 98).

Etapa	Fe	Cu	Mn	Zn
	-----ppm-----			
6 hojas	0.7-1.2	0.15-0.25	1.4-3.1	0.7-1.2
12 hojas	0.1-1.5	0.10-0.25	0.9-2.3	0.5-1.5
Inicio de botoneo	0.1-0.8	0.10-0.25	0.3-1.4	0.5-1.4
Desarrollo del florete	0.1-0.6	0.10-0.20	0.5-0.9	0.6-1.0
Pre-cosecha	0.1-0.5	0.10-0.15	0.8-1.0	0.5-1.2
El muestreo se realizó en la hoja más reciente madura (4ta ó 5ta hoja).				

EFFECTO VARIETAL

En la Tabla 6 se presenta la concentración de N, P y K determinadas en peciolo seco en cinco variedades de brócoli cultivadas durante 1998 bajo fertirriego en Celaya, Gto. Como puede verse no se encontraron diferencias significativas en la determinación de N, P y K en peciolo en la etapa de desarrollo de florete y precosecha en las cinco variedades evaluadas durante este ciclo. Estos resultados, preliminarmente nos sugieren que los niveles de suficiencia que se han generado en este trabajo para los cultivares Legacy y Patriot podrían ser utilizados para monitorear a través del peciolo seco y probablemente en hoja, la nutrición de otras variedades de brócoli que se cultivan en el Bajío.

Es importante recalcar que los análisis de peciolo ya sea en el extracto celular o en la materia seca se han utilizado mas para determinar el abastecimiento de nitrógeno, que es el nutrimento de mayor importancia en todos los cultivos. En el presente trabajo estos valores fueron determinados mediante la relación de respuesta Nitrogeno-rendimiento y realizando los ajustes de regresión con el riguroso análisis estadístico. En el caso de los demás nutrimentos solo se evaluaron dos niveles de nutrimento, por lo que no pueden ser considerados en forma estricta como niveles de suficiencia, sin embargo dan una idea aproximada de dicho nivel. En la Tabla 7 Se presentan los niveles de suficiencia en peciolo seco y en extracto celular de peciolo para varios cultivos hortícolas bajo las condiciones de California, USA (Hartz, 1994).

Tabla 6. Variación del contenido de nutrientes en peciolo seco en 5 variedades de brócoli durante 1998.

Cultivares	N-NO ₃ ppm	P-PO ₄ -----%	K -----
Desarrollo del florete (67 DDT)			
Dinasty	7307 A	0.305 A	4.97 A
Pirata	9419 A	0.280 A	4.22 A
Pilgrim	8471 A	0.380 A	4.12 A
BR-68	6560 A	0.355 A	4.09 A
Patriot	7674 A	0.378 A	3.9 A
DMS	NS	NS	NS
CV.	15.05	7.43	10.97
Precosecha (81 DDT)			
Dinasty	3794 A	0.28 A	4.23 A
Pirata	5433 A	0.28 A	5.17 A
Pilgrim	5049 A	0.26 A	4.68 A
BR-68	6062 A	0.31 A	5.80 A
Patriot	4250 A	0.33 A	4.93 A
DMS	NS	NS	NS
CV.	33.12	9.93	11.80

Tabla 7. Niveles de suficiencia en pecíolo seco y en extracto celular de pecíolo para varios cultivos hortícolas bajo las condiciones de California, USA (Hartz, 1994).

Cultivo	Estadío de desarrollo	Contenido de N-NO ₃ en Pecíolo, ppm	
		Tejido seco	Extracto celular
Brócoli	Mediados de desarrollo	10,000-20,000	1,000-1,600
	Formación de botón	8,000-15,000	800-1,200
	Pre-cosecha	5,000-8,000	600-1,000
Melón	Inicios de Floración	12,000-15,000	1,000-1,200
	Desarrollo del fruto	8,000-10,000	800-1,000
	Primer cosecha	4,000-6,000	700-800
Apio	Mediados de desarrollo	7,000-10,000	300-500
	Pre-cosecha	6,000-8,000	300-400
Lechuga	Mediados de desarrollo	7,000-12,000	400-600
	Pre-cosecha	6,000-8,000	300-500
Chile	Desarrollo vegetativo	7,000-10,000	900-1,200
	Inicio floración/cuajado	5,000-8,000	700-1,000
	Desarrollo del fruto	5,000-8,000	700-1,000
	Cosecha	5,000-7,000	700-900

BIBLIOGRAFIA

- Abbott, J.S. 1988. Microirrigation-World wide usage. Report by microirrigation working group. ICID Bul. 37, No 1:1-12.
- Aceves, E. 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Posgraduados. 382 p.
- Ayers, R.S. y D.W. Westcot. 1985. Water Quality for Agriculture. Irrigation and Drainage Paper. No 29. FAO, Roma.
- Burt, C., K. O Connor y T. Ruehr. 1995. Fertigation. ITRC. San Luis Obispo, Ca. 295 p.
- Echavez, G. 1998. Sistema de Riego presurizado de baja carga para el desarrollo rural. En: Memorias del 3er Simposio Internacional de Fertirrigación. P. 121-130. Leon, Gto, Mexico.
- Castellanos, J.Z. 1987. Las curvas de acumulación nutrimental en los cultivos hortícolas y su importancia en los programas de fertirrigación. En: Memorias del 2º Simposio Internacional de Fertirrigación. Qro. Mexico. p. 73-82.
- Echavez, G. 1998. Sistema de Riego presurizado de baja carga para el desarrollo rural. En: Memorias del 3er Simposio Internacional de Fertirrigación. P. 121-130. Leon, Gto, Mexico.
- Hart, T. 1994. Drip irrigation and fertigation management of vegetable crops. California Dept. of Food and Agriculture. Sacramento, Ca. 19 p.
- Thompson, T.L. 1987. Fertigation of Vegetable crops: The Arizona Experience. En: Memorias del 2º Simposio Internacional de Fertirrigación. Qro. Mexico. p. 83-90.

MANEJO DEL RIEGO Y CALCULOS EN FERTIGACION

Marcelo Calvache U*

INTRODUCCION

En las últimas décadas, la práctica de fertigación ha alcanzado considerables avances con el mejoramiento de métodos de riego y en la mejor utilización del equipo, que por mucho tiempo fue solamente empleado para aplicaciones del agua. Hoy se sabe que el sistema de riego es un excelente conductor y distribuidor de cualquier producto químico. Cuando el producto aplicado es un fertilizante, la técnica se llama fertigación.

La fertigación se inició en el oeste de los Estados Unidos en riego por surcos. En 1930, en California el fertirriego fue utilizada en huertos frutales. En países como Estados Unidos, Israel, Italia, Francia, Inglaterra, etc., su uso se tornó generalizado, principalmente con el desarrollo del riego por goteo (Frizzzone et al., 1985).

En Ecuador, debido a la falta de investigación en esta área, la fertigación se usa de modo ineficiente. Sin embargo, existe una marcada tendencia a emplearse cada más, ya sea para optimizar el uso del equipo de riego, para reducir el costo de la fertilización y por otras ventajas que serán discutidas en este artículo.

SISTEMAS DE RIEGO: VENTAJAS Y LIMITACIONES PARA LA APLICACION DE FERTILIZANTES

La fertilización combinada con el agua de irrigación se adapta a todos los sistemas de riego, sean fijos, semi-fijos o móviles. Sin embargo, cada sistema presenta características particulares de distribución, lo que afecta el manejo del fertilizante.

Riego por goteo

El riego por goteo se ha convertido en el medio más popular de aplicación de agua y fertilizantes. Teniendo en cuenta que el gotero es una fuente puntual de ingreso, el agua penetra en el suelo y se mueve para abajo y para los lados formando un cono o bulbo. El tamaño y la forma del bulbo son afectados principalmente por el caudal del gotero, tipo de suelo, y tiempo de aplicación Benani y

Offen, 1984). La distribución del agua en el perfil del suelo comprende tres regiones (Zanini, 1991):

1. Zona de transición, formada inmediatamente bajo la superficie del suelo, con el contenido de agua cerca de la saturación.
2. Zona mojada, donde la mayoría de las raíces se desenvuelven. El agua llega en este punto por gravedad y capilaridad. En esas dos regiones, la cantidad de agua decrece con la distancia del punto de suministro y las condiciones de aireación aumentan.
3. Frente de mojamiento, donde la humedad es muy próxima a la humedad inicial del suelo. En los suelos arcillosos hay predominio de fuerzas capilares y el bulbo se torna más achatado y plano, que en los suelos arenosos.

Las ventajas de riego por goteo con relación a los otros sistemas incluyen factores como uso más eficiente del agua, aplicación de la solución del fertilizante en la zona activa de las raíces de donde el agua está siendo removida, menor pérdida del fertilizante por lixiviación y la aplicación localizada no favorece el desarrollo de enfermedades foliares.

Entre las limitaciones de este sistema se encuentran la variabilidad de la descarga de agua en cada emisor, la necesidad de filtrar las soluciones para eliminar partículas sólidas, obstrucción de los emisores por microorganismos, algas o precipitados formados por la acción de algunos fertilizantes con el agua de riego, las soluciones ácidas ó alcalinas tienen mayor efecto negativo en el suelo debido a que se concentran en un pequeño volumen y el sistema radicular se vuelve más restringido (Karmelli y Keller, 1975).

Riego por aspersión

Los sistemas de riego por aspersión se caracterizan por la distribución del agua en toda la superficie, lo que es deseable en la aplicación de productos químicos en suspensión o en solución, como es el caso de los fertilizantes, agroquímicos, etc.

Una ventaja de la aspersión, en relación con riego por goteo, es la velocidad de conducción del agua en las tuberías de distribución, lo que disminuye la

* Profesor Principal, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central, Quito - Ecuador

sedimentación de las partículas sólidas reduciendo los riesgos de obstrucción de las tuberías y de los emisores. Entre las limitaciones del sistema están el mayor consumo de agua, mayores problemas con enfermedades en las plantas, menor aprovechamiento del agua aplicada, principalmente en la fase inicial de los cultivos cuando las raíces no están plenamente desarrolladas.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL FERTIRIEGO

Ventajas

1. Distribución del fertilizante y localización.- La solución conteniendo nutrientes se diluye homogéneamente en el agua de riego y ésta es distribuida en el campo de la misma forma que el agua.
2. Flexibilidad de aplicación.- El fertirriego permite gran versatilidad en la época de aplicación de nutrientes, se puede dosificar más rigurosamente las cantidades de nutrientes y suministrarlas según las necesidades de las plantas.
3. Eficiencia de uso del fertilizante.- En función del mayor fraccionamiento de la fertilización, hay un mejor aprovechamiento del fertilizante aplicado. Esto lleva a una reducción de las cantidades aplicadas en relación a la fertilización convencional.
4. Comodidad.- Contrariamente a otros métodos de fertilización, los equipos de fertirriego son cómodos y bastante rápidos, pues se trata de un único equipo central para toda el área.
5. Aplicación balanceada de macro y micro nutrientes.- La fertirrigación permite una aplicación uniforme de los nutrientes en el suelo. Los micronutrientes que son utilizados en pequeñas cantidades, pueden ser aplicados también en esta forma.
6. Disminución de la compactación del suelo.- La fertirrigación reduce problemas de formación de capas compactas considerando que con esta práctica se reduce el tráfico de máquinas y de personal en el área.
7. Control de la profundidad de aplicación.- Debido a que los nutrientes se mueven en el suelo a través del agua, es posible determinar la profundidad a la que deben llegar en el perfil, para una mejor absorción radicular.

Limitaciones

1. Restricción de fertilizantes.- Las fuentes de fertilizantes utilizadas tienen que presentar alta solubilidad.
2. Reacción de los fertilizantes en la línea de riego.- En función de la calidad de agua que se utiliza en la irrigación, (principalmente cuando son ricas en calcio) y del fertilizante, pueden formarse precipitados en la red lo que ocasiona obstrucción en los emisores.
3. Corrosión del sistema de riego.- El efecto salino de los fertilizantes puede ocasionar daño en el sistema, debido a su efecto corrosivo.
4. Necesidad de investigación.- La falta de información sobre dosis, tipo de fertilizante, época y modo de aplicación del fertilizante vía irrigación limita la difusión de la técnica.
5. Contaminación.- La utilización incorrecta de la técnica de fertirrigación puede llevar a la contaminación de la capa freática y de la fuente de captación de agua.

FACTORES QUE AFECTAN LA FERTIRRIGACION

Calidad de Agua

El éxito de la aplicación de los fertilizantes en el agua de riego depende de la calidad del agua. Algunas de las características que influyen en el agua como medio apropiado para contener nutrientes se presentan en la tabla 1.

Las características del agua tienen mayor o menor importancia en función del tipo de riego utilizado y del modo de aplicación. La aplicación vía aspersión limita la concentración de sales como sodio, cloro, boro y flúor que al caer sobre las plantas pueden causar daños en las hojas. Sin embargo, altas concentraciones, pueden ser toleradas si las hojas fueren lavadas con agua después de la aplicación. Las condiciones de salinidad en el agua de riego o el exceso de fertilizante pueden tener efecto significativo en la producción. La Tabla 2 indica la tolerancia de varias hortalizas a la salinidad.

Muchos de los cultivos en la lista están en la clasificación de sensibles a moderadamente sensibles. Eso indica que estos cultivos por lo general no

toleran las condiciones de salinidad. Estudios con maíz dulce, clasificado como moderadamente sensible, han demostrado que las condiciones de salinidad pueden ser manejadas con pequeños intervalos de riego cuando se usan microaspersores.

La influencia de la salinidad en el agua de riego sobre la tolerancia de las hojas y raíces han sido estudiadas en algunos cultivos. Mass (citado por Stanley y Maynard, 1991) concluye que utilizando riego por aspersión en una cucurbitacea, tomate y pimiento, el límite de tolerancia para el agua de irrigación salina fue más alto para el sistema radicular que para las hojas. La relación fue inversa con fresa, en la cual, las raíces fueron más susceptibles a las condiciones de salinidad.

Obstrucción del sistema de irrigación

La estructura y forma de operación de los emisores utilizados en el riego localizado, no toleran impurezas en el agua de riego y en el fertilizante, a fin de evitar la obstrucción de los goteros y de los microaspersores.

De modo general, el agua contiene elementos de textura gruesa que pueden ser filtrados y también cantidades apreciables de iones de elementos químicos y biológicos que no son filtrados (Tabla 3). Por ejemplo, el calcio y el ácido carbónico en determinadas condiciones, como en el caso del aumento de la temperatura, reaccionan formando precipitados de carbonato de calcio. Esta precipitación puede acelerarse también con el aumento del pH del agua, como el provocado con la adición de fertilizante amoniacal en el agua de riego.

El fósforo soluble en combinación con el calcio o magnesio, que se deposita en forma de sales insolubles dentro del sistema de riego, puede obstruir los goteros o los microaspersores. Por esta razón, no se recomienda introducir fertilizantes fosfatados en el agua de riego.

Tabla 1. Potenciales problemas en fertigación causados por la calidad del agua.

Análisis	Niveles de severidad		
	Ninguno	Alto	Severo
pH	5.5-7.0	<5.5 a > 7.0	<4.5 a > 8.0
C. eléctrica (mmhos) ^a	0.5-0.75	0.75 - 3.0	>3.0
T. sólidos sol. (ppm)	325-480	480 - 1920	>1920
Bicarbonatos (ppm)	<40	40 - 180 ^b	>180 ^c
Calcio (ppm)	20-100	100-200	>200 ^c
Magnesio (ppm)	<63	>63 ^c	
SAR ^d	<63	3 - 6	>6
Boro (ppm)	<0.5	0.5 - 2.0	>2
Cloro (ppm)	<70	70-300	>300
Fluor (ppm) ^e	<0.25	0.25-1.0	<1.0
Hierro (ppm) ^f	<0.2	0.2 - 0.4	>0.4
Nitrógeno (ppm) ^g	<5	5 - 30	>30
a) Valores bajo 0.5 son satisfactorios si el agua contiene calcio suficiente. El agua baja en calcio puede aumentar problemas de permeabilidad en ciertos suelos. b) Menos severa si K está presente en igual cantidad c) Grandes cantidades de Ca o Mg aumenta la precipitación de P. No usar P en la irrigación si el agua tiene más de 120 ppm de calcio y pH en el agua <4.0 d) Rango de absorción de sodio, calculado a través de la siguiente fórmula: $SAR = Na/((Ca + Mg)/2)^{1/2}$, donde Na, Ca y Mg son dados en meq/l e) Valores significativos para las plantas sensibles al flúor f) Concentración mayor de 0.4 ppm puede formar residuo con el C1. g) Suma de nitrato y amonio. Valores mayores de 5 ppm estimulan surgimiento de algas.			

Tabla 2. Tolerancia relativa de las hortalizas a la salinidad (Stanley y Maynard, 1991)

Cultivos	Conductividad eléctrica en suelo saturado		Clasificación
	(1)	(2)	
Espárrago	4.1	2.0	T
Fréjol	1.0	19.0	S
Remolacha	4.0	9.0	GT
Brócoli	2.8	9.2	LS
Col de brus.	—	—	S
Repollo	1.8	9.7	LS
Zanahoria	1.0	14.0	S
Coliflor	—	—	LS
Apio	1.8	6.2	LS
Maíz dulce	1.7	12.0	LS
Calabaza	2.5	13.0	LS
Col	—	—	LS
Lechuga	1.3	13.0	LS
Cebolla	1.2	16.0	S
Rosas	4.0	20.0	S
Pimiento	1.5	14.0	LS
Papas	1.7	12.0	LS
Rábano	1.2	13.0	LS
Espinaca	2.0	7.6	LS
Fresa	1.0	3.0	S
Tomate	2.5	9.9	LS
Melón	—	—	LS

(1) Valor límite que perjudica la productividad (dS/m)
 (2) Porcentaje de pérdida en la productividad por unidad de dS/m a partir del nivel crítico
 T = Tolerante, GT = Generalmente Tolerante, LS = Levemente Sensible, S = Sensible

Tabla 3. Principales factores que contribuyen para la obstrucción del sistema de goteo.

Físico (Suspensión sólida)	Químico (precipitación)	Biológico (bacterias y algas)
Partículas inorgánicas Arena Limo Arcilla	Carbonato de Ca o Mg, Sulfato de Ca	Filamentos Lodos
Orgánicas Plantas acuáticas (zooplancton) Bacterias	Metal pesado en la forma de carbonato, silicato y sulfato Fertilizantes fosfatados, agua amoníaca, Fe, Cu, Zn y Mn.	Deposición microbiológica Aceite y otros lubricantes

Apesar de que los fertilizantes fosfatados inorgánicos aplicados por el sistema de riego por goteo producen la obstrucción del sistema, con ciertas precauciones, el ácido fosfórico puede ser aplicado con bastante éxito (Grobelaar y Louriens, 1974, citado por Frizzone et al., 1985). Para agua con pH elevado, el ácido fosfórico debe ser aplicado a una tasa tal, que posibilite la reducción del pH a valo-

res inferiores a 6.5 a fin de evitar precipitaciones químicas.

El óxido ferroso es también un agente que causa obstrucción, pues se presenta en suspensión en forma de partículas gruesas y finas. Las partículas gruesas son retenidas por los filtros, pero las partículas finas en gran concentración se depositan obstruyendo el sistema (algunas veces en combina-

ción con las partículas de limo o de materia orgánica).

Problemas con la obstrucción de los emisores pueden ocurrir también debido a la acción de los microorganismos. Algas que crecen en los tubos pueden ser controladas con sulfato de cobre. Otros

productos químicos pueden ser usados como alguicidas.

La acidificación del agua de riego puede prevenir problemas de obstrucción (Tabla 4) y es usada para limpiar líneas y emisores.

Tabla 4. Efecto del tratamiento del agua en la obstrucción del sistema de goteo (Buck et al., 1982).

Filtro	Tratamientos		% de emisores obstruidos ¹
		Químico	
A tela de 50 mesh	-----		68
B tela de 50 mesh		Cloro + H ₂ SO ₄	68
C arena [sílica # 20 + tela (200 mesh)]		Cloro (10mg/1) + H ₂ SO ₄	23
D idem C		idem B	18
E idem C		Cloro (1mg/1) + H ₂ SO ₄ (pH bajo 7.0)	14
F idem C		H ₂ SO ₄ (pH bajo 7.0)	8
¹ Total o con salida menor que el 50% de la inicial.			

Los ácido sulfúrico o clorhídrico son comúnmente usados para reducir la precipitación química. El ácido fosfórico puede también ser utilizado como tratamiento del agua y fuente de fertilizante (Rols-ton et al., 1979).

La Sociedad Americana de Ingeniería recomienda que los filtros para sistemas de goteo tengan de 100 a 200 mesh de malla, pudiendo en algunos casos llegar a mallas de 600 mesh.

Textura del Suelo

Una de las características del suelo que más influye en la eficiencia de absorción del nutriente aplicado a través de la fertirrigación es la textura del suelo. La fertirrigación es más ventajosa para suelos de textura gruesa que para los de textura fina, en especial para el nitrógeno. En suelos arenosos, con alta probabilidad de lixiviación, la aplicación de pequeñas dosis de nitrógeno dividido durante el crecimiento de la planta aumenta la disponibilidad del nutriente en la capa de suelo donde se encuentra el sistema radicular.

Por otro lado, en suelos de textura fina, donde la lixiviación de nutrientes es restringida y una aplicación es suficiente, la fertirrigación no ofrece ventajas sobre otros métodos de fertilización (Cladwell, 1977). Los nutrientes de mayor éxito

aplicados a través de irrigación son N, S, B y K en suelos arenosos. El K no debe ser aplicado en la presiembra en suelos arcillosos (Rhoads y Bennet, 1990).

EJEMPLO DE CALCULO PARA APLICAR FERTILIZANTES VIA FERTIRRIEGO

Para aplicar los fertilizantes vía fertirriego, es necesario conocer la lámina de agua evapotranspirada durante un ciclo o período de cultivo y los requerimientos de nutrientes durante este ciclo.

Por ejemplo, si un cultivo de rosas requiere de 3 mm/día como lámina de riego y la recomendación de fertirriego es de 200 ppm de N; 5 ppm de P y 30 ppm de K, la solución madre se preparará tomando en cuenta los fertilizantes disponibles, la relación de inyección o factor de dilución y el tamaño del recipiente. En este ejemplo la preparación de las soluciones se realizará según las recomendaciones de Papadopoulos (1987) y la evapotranspiración real del cultivo se calculará utilizando el Lisímetro "MC", o el método del balance hídrico, presentado por Calvache (1993). El desarrollo completo de ejemplo se presenta a continuación:

Datos:

Lámina de riego: 3 mm/día.

Recomendación de fertilización: Se requiere de una solución de N = 200, P = 5 y K = 30 g / m³ (ppm).

Fertilizantes disponibles: NH₄NO₃ (34 – 0 – 0), KNO₃ (13 – 0 – 46) y ácido fosfórico 85 %.

Inyector hidráulico de la solución: 10 golpes/min, 250 ml/golpe.

Caudal principal para el riego: 15 m³/h

Reservorio para preparar la solución madre de fertilizantes: 1 m³

Cálculos para preparar la solución madre. Utilizando las siguientes formulas:

$$C = \frac{F \cdot DF \cdot n \cdot 100}{a}$$

Donde:

- C = Cantidad de fertilizante en gramos en la solución madre
 F = Concentración de nutriente en el agua de irrigación
 n = Volumen de la solución madre en m³
 a = % de pureza del nutriente en el fertilizante
 DF = Factor de dilución

$$DF = \frac{\text{Cantidad de agua para el riego}}{\text{tasa del inyector}}$$

$$DF = \frac{15000 \text{ l/h}}{10 \text{ golpes/min} \cdot 0.25 \text{ l/golpe} \cdot 60 \text{ min/h}}$$

$$= \frac{15000}{150} = 100$$

Cálculo del potasio (K)

$$C = \frac{F \cdot DF \cdot n \cdot 100}{a}$$

F = 30 ppm
 n = 1 m³
 a = 46 % de K₂O = 46 / 1.2 = 38.3 de K
 DF = 100

$$C = \frac{30 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 100}{38.3} = 7826 \text{ g KNO}_3 / \text{m}^3 \text{ de solución madre}$$

Cálculo del nitrógeno (N) del KNO₃

$$F = \frac{C \cdot a}{DF \cdot n \cdot 100}$$

C = 7826 g
 F = ?
 n = 1 m³
 a = 13% de N
 DF = 100

$$F = \frac{7826 \cdot 13}{100 \cdot 1 \cdot 100} = 10 \text{ g N/ m}^3 \text{ de agua de irrigación}$$

Estos 10 ppm de N se aplican cuando se disuelven los 7826 g de KNO₃

Cálculo de N adicional

$$N \text{ por adicionarse} = 200 - 10 = 190 \text{ ppm}$$

$$C = \frac{F \cdot DF \cdot n \cdot 100}{a}$$

C = ?
 F = 190 ppm
 n = 1 m³
 a = 34
 DF = 100

$$C = \frac{190 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 100}{34} = 55882 \text{ g NH}_4 \text{ NO}_3 / \text{m}^3 \text{ de solución madre}$$

Cálculo del fósforo (P)

Acido fosfórico = (85 % H_3PO_4);
densidad = 1.7 kg /litro

$$P \text{ en el ácido fosfórico} = \frac{85 \cdot 31}{98} = 26.9\%$$

$$C = \frac{F \cdot DF \cdot n \cdot 100}{a}$$

C = ?

F = 5 ppm

n = 1 m³

a = 85 % de H_3PO_4 = 26.9 % de P

FD = 100

$$C = \frac{5 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 100}{26.9} = 1860 \text{ g } H_3PO_4/m^3 \text{ de solución madre}$$

1.86 kg/1.7 kg/litro = 1.1 litros/m³ de solución madre

RESUMEN

Para preparar una solución de 200 ppm N, 5 ppm P y 30 ppm K se necesita de las siguientes cantidades de los fertilizantes disponibles: 55.9 kg NH_4NO_3 , 7.8 kg KNO_3 , 1.1 litros /ácido fosfórico (85%) por m³ de solución madre.

Esta solución madre será suficiente para 100 m³ de agua de riego (FD).

Si la lámina de riego (L) es 3 mm /día y la cantidad de agua para el fertirriego por día (V) es de 100 m³/día, el área que se puede regar se calcula con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{V}{L} = \frac{100 \text{ m}^3}{0.003 \text{ m}} = 33333 \text{ m}^2$$

DETERMINACION DEL BALANCE HIDRICO

El balance hídrico es una metodología utilizada para la programación de riegos que ha sido ampliamente evaluada en algunas regiones agrícolas del mundo. El Lisímetro "MC" (Figura 1) permite programar los riegos debido a que integra los diferentes parámetros del balance hídrico, como son la

evaporación, precipitación, drenaje y almacenamiento de agua.

Las evaluaciones del Lisímetro "MC" se basan en el principio de considerar al suelo como un reservorio de agua para las plantas, utilizando el concepto de balance hídrico como un proceso que opera continuamente a nivel natural en el campo de cultivo. Es muy práctico ya que funciona como un pluviómetro y un tanque de evaporación, midiendo la evapotranspiración relativa, la misma que corresponde a la cantidad de agua perdida por evaporación directa desde la superficie del suelo y por transpiración a través de la superficie de las hojas de las plantas. (Calvache, 1993).

El Lisímetro "MC" simula los cambios de almacenamiento de agua en el suelo y tiene definida una capacidad máxima de almacenamiento de agua a capacidad de campo (Acc), por medio de un orificio, por donde drena el exceso de agua que en condiciones naturales no sería retenida en el suelo. El nivel de agua en el recipiente baja poco a poco de acuerdo a la evaporación y aumenta de acuerdo a la lluvia, y el riego se programa cuando el nivel de agua se acerca a la marca de almacenamiento crítico (A crítico).

Almacenamiento crítico (A crítico) es aquel nivel de agua en el suelo que no disminuye la productividad de los cultivos. Este valor se obtiene mediante experimentación de campo, midiendo la unidad del suelo en forma periódica. La cantidad de agua que se puede dejar agotar en el suelo, sin que exista reducción de la productividad se denomina factor f y se calcula con la siguiente expresión:

$$f = \frac{\text{Acc} - A \text{ crítico}}{\text{Acc} - \text{APMP}}$$

Donde:

Acc = Almacenamiento de agua capacidad de campo

APMP = Almacenamiento de agua en el punto de marchitez permanente

A crítico = Almacenamiento de agua crítico

Por Ejemplo, si un suelo tiene, hasta una profundidad de 50 cm, una capacidad de almacenamiento de las siguientes características:

Acc = 150 mm

APMP = 60 mm

A crítico = 114 mm

El factor f es :

$$f = \frac{150 - 114}{150 - 60} = \frac{36}{90} = 0.4 \text{ o } 40\%$$

Es decir, que se puede dejar agotar hasta el 40% del agua disponible antes de realizar el próximo riego.

El Lisímetro “MC” se puede construir usando recipientes cilíndricos de plástico, de paredes verticales, los cuales se pueden adquirir en locales de

expendio de plástico o se pueden usar recipientes de pintura vacíos.

Para calcular la lámina de riego (Lr) del cultivo, se determina la evaporación relativa del cultivo (EV.REL) y se multiplica por el coeficiente Kc. La evaporación relativa se calcula restando del valor de A a capacidad de campo (Acc) el valor de A en la regleta (ΔA) a un período de tiempo determinado (ΔT).

El período de cultivo es variable de acuerdo a la edad y el tipo de cultivo, distinguiéndose cuatro etapas: Etapa inicial, etapa de desarrollo, etapa intermedia y etapa final. En la tabla 5 se presentan los valores de Kc para algunos cultivos en el Ecuador.

Tabla 5. Coeficientes culturales (Kc) de varios cultivos (Dorenbos y Pruitt, 1975).

CULTIVO	Etapas de desarrollo del cultivo			Ciclo Vegetativo Total
	Inicial	Media	A la Cosecha	
Banana				
Tropical	0.4 – 0.5	1.0-1.1	0.75-0.85	0.7-0.8
Subtropical	0.5 - 0.65	1.0-1.2	1.0 – 1.15	0.85 – 0.95
Frijol				
Verde	0.3 – 0.4	0.95 – 1.05	0.85 – 0.95	0.85 – 0.9
Seco	0.3 – 0.4	1.05 – 1.2	0.25 – 0.3	0.7 – 0.8
Col	0.4 – 0.5	0.95 – 1.1	0.8 – 0.95	0.7 – 0.8
Algodón	0.4 – 0.5	1.05 – 1.25	0.65 – 0.7	0.8 – 0.9
Vid	0.35 – 0.55	0.7 – 0.9	0.55 – 0.7	0.55 – 0.75
Maíz				
Dulce	0.3 – 0.5	1.05 – 1.2	0.95 – 1.1	0.8 - 0.95
Grano	0.3 – 0.5*	1.05 – 1.2*	0.55 – 0.6*	0.75 – 0.9*
Cebollas				
Secas	0.4 – 0.6	0.95 – 1.1	0.75 – 0.85	0.8 – 0.9
Verdes	0.4 – 0.6	0.95 – 1.05	0.95 – 1.05	0.65 – 0.8
Arveja, verde	0.4 – 0.5	1.05 – 1.2	0.95 – 1.1	0.8 – 0.95
Pimiento verde	0.3 – 0.4	0.95 – 1.1	0.8 – 0.9	0.7 – 0.8
Patata	0.4 – 0.5	1.05 – 1.2	0.7 – 0.75	0.75 – 0.9
Soja	0.3 – 0.4	1.0 – 1.15	0.4 – 0.5	0.75 – 0.9
Remolacha azucarera	0.4 – 0.5	1.05 – 1.2	0.6 – 0.7	0.8 – 0.9
Rosas	0.4 – 0.5	0.95 – 1.1	0.6 – 0.7	0.8 – 0.9
Caña de azúcar	0.4 – 0.5	1.0 – 1.3	0.5 – 0.6	0.85 – 1.05
Girasol	0.3 – 0.4	1.05 – 1.2	0.35 – 0.45	0.75 – 0.85
Tabaco	0.3 – 0.4	1.0 – 1.2	0.75 – 0.85	0.85 – 0.95
Tomate	0.4 – 0.5	1.05 – 1.25	0.6 – 0.65	0.75 – 0.9
Sandía	0.4 – 0.5	0.95 – 1.05	0.65 – 0.75	0.75 – 0.85
Alfalfa	0.3 – 0.4		1.05 – 1.2	0.85 – 1.05
Cítricos desyerbe total				0.65 – 0.75
sin control de maleza				0.85 – 0.9
Olivo				0.4 – 0.6
Primera cifra: con humedad elevada (HR min > 70%) y poco viento (U < 5 m/sec). Segunda cifra: con humedad reducida (HR min < 20 %) y fuerte viento (> 5 m/sec).				



Figura 1. Instalación del lisímetro "MC".

En la Figura 2 se presentan los datos de la evapotranspiración acumulada en función del tiempo (días) en un cultivo de babaco en invernadero, en el CADET de la Universidad Central, durante los meses de mayo y junio de 1997, utilizando el lisímetro MC. Una vez determinada la lámina de riego, se aplica el riego en el campo, aplicando la siguiente fórmula:

$$Q \cdot T = A \cdot L$$

Donde:

Q = caudal (l/seg.)

T = a tiempo de riego (horas o minutos)

A = área (m²)

L = lámina de riego (milímetros o litros por m²).

Por ejemplo, si se requiere regar por goteo una superficie de 300 m², con una lámina de riego de 40 mm, con un caudal de 2 l/seg, el tiempo de riego será:

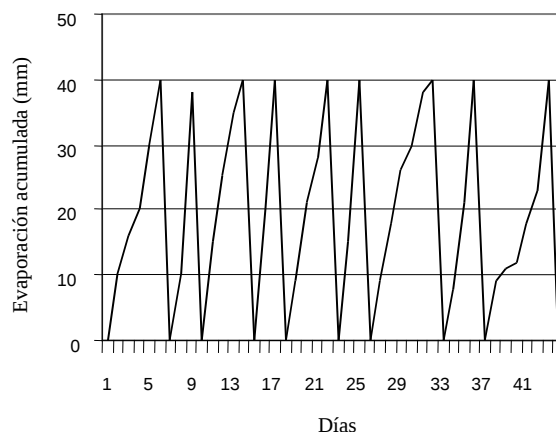


Figura 2. Evapotranspiración en el cultivo de babaco bajo invernadero.

$$T = \frac{300\text{m}^2 \cdot 40 \text{ l/m}^2}{2 \text{ l/seg.}} = 6000 \text{ seg} = 100 \text{ min}$$

Una vez dado el riego de acuerdo a la lámina requerida, hasta la capacidad de campo, se vuelve a llenar el Lisímetro "MC" hasta la altura del orificio del drenaje, que equivale al almacenamiento de agua a capacidad de campo (Acc), y se repite el procedimiento.

En la Tabla 6 se presenta un ejemplo de cálculo de balance hídrico en el cultivo de rosas, utilizando la siguiente fórmula de balance de masas:

$$ET = (A_i - A_f)$$

Donde:

ET = Evapotranspiración real

A_i = Almacenamiento inicial

A_f = Almacenamiento final

Tabla 6. Ejemplo de cálculo de balance hídrico en el cultivo de rosas bajo invernadero.

Fecha	A (mm)	ΔA (mm)	Ev. Relativa (mm)	Kc.	Lr (mm)	(mm/día)
1/06/93	340					
3/06/93	325	15	15	0.8	12	6
6/06/93	313	12	12	0.8	9.6	3.2
10/06/93	293	20	20	0.8	16.0	4.0
15/06/93	273	20	20	0.8	16	4.0

En Checa, provincia de Pichincha se probó la viabilidad de programar los riegos siguiendo un balance hídrico diario utilizando las sondas de neutrones, un balance hídrico semanal, utilizando el modelo Cropwat de la FAO y el balance hídrico en el Lisímetro MC. Se utilizaron parcelas de 100 m² sembradas con rosas, en un suelo franco arenoso. No se presentaron diferencias en el número de riegos programados por los dos métodos. Los resultados que se presentan en la Tabla 6 confirman la funcionalidad de este método sencillo, que permite contar con una alternativa para la programación de los riegos en el cultivo de rosas. Como se puede observar en la tabla 6, la lámina de riego es variable en los 15 días presentados, entre 3.2 y 6.0 mm/día, lo que depende del comportamiento del clima dentro del invernadero.

En las plantaciones de rosas del Ecuador, es común la aplicación de recomendaciones de fertiriego de 200 ppm de N, 40 ppm de P y 120 ppm de K, sin especificar la lámina de riego a aplicar. La tabla 7 presenta las cantidades de N, P y K que se aplicarían con láminas de 3, 6, 9 y 12 mm/día.

Tabla 7. Cantidades de N, P y K en kg/año que se aplicarían con diferentes laminas de riego.

Lámina de riego	N	P	K
mm/día	(kg/ha)		
3	2190	438	1314
6	4390	876	2628
9	6570	1314	3942
12	8760	1752	5256

Las cantidades de nutrientes aplicadas con las láminas de 6, 9 y 12 mm/día son exageradamente altas y estarían provocando la acumulación de sales no absorbidas por las plantas, lo que aumenta la conductividad eléctrica y provoca la salinización del suelo.

BIBLIOGRAFIA

Benani, A., and A. Ofen. 1984. Irrigation engineering. Haifa, International Irrigation Information Center, 257 p.

Bucks, D. A., F.S Nakayama, and A.W. Warrick. 1982. Principles, practices, and potentialities of trickle (drip) irrigation. In: HILLEL, D. de. Advances in Irrigation. New York, Accademic Press. vi, p.220-298.

Cadwell, A.C., L.S. Murphy, B.B. Tuckler, R.A. Weise, and J.C. Zubrinski. 1997. Roundtable irrigation-fertigation. *Crop Soils* 29:14-21 1977.

Calvache, M., 1993. Requerimientos hídricos de los cultivos en Tumbaco, Pichincha, Universidad Central del Ecuador. Quito, P. V.

Dorenboos, M., and W.O. Pruit. 1975. Crop water requirements. *Artículos de riego y Drenaje* N° 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma.

Frizzone, J.A., J.R. Zanini, L.A.D. Paes, e V.M. Nascimento do. 1985. Fertirrigação mineral. Ilha solteira, UNESP. 31p. (Boletim Técnico, 2).

Gasho, G.J., J.E.E. Hook, and G.A. Mitchell. 1984. Sprinkler-applied and side-dressed nitrogen for irrigated corn grown on sand. *Agronomy Journal* 76(1): 77-88.

Hernández Abreu, J.M., J. Rodrigo López, A. Pérez Regalado, y J.F. Hgonzález ernández. 1987. El riego localizado. Madrid, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 1987. 31p.

Karmeli, D.E., and J. Keller. 1975. Trickle Irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp., Glendora, California, 133 p.

Maas, E.V. 1985. Crop tolerance to saline sprinkling water. *Plant Soil* 89: 273-284.

Papadopoulos. E. 1987. An experimental system for fertigation with experimental purposes. *Plant and Soil*, 102: 141-143.

Rehm, G.W. and Wieser, R.A. 1975. Effect of method nitrogen application on corn (*Zea mays* L.) grown on irrigated sandy soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 39(1):217-20.

Rhoads, F.M., Bennet, J.M. In: Stewart, B.A. and Nilsen, D.R. 1990. ed. Irrigation of Agricultural Crops. Madison, ASA, p. 569-97.

Rolston, D.E., Rauschkold, R.S., Phene, C.J., Uriu, K. and Henderson, D.W. 1979. Applying nutrients and other chemicals to trickle-irrigated crops. Berkeley, Univ. Calif., 14 p.

Stanley, C.D. and Maynard, D.N. Vegetables. In: Stewart, B.A. and Nilsen, D.R. 1991. Irrigation of Agricultural Crops. Madison, ASA. p. 921-50.

Zanini, J.R. 1991. Distribuição de água e de íon K⁺ no solo, aplicados por fertirrigação em gotejamento. I. Formação do bulbo molhado. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, 45: 13-24.

REQUERIMIENTOS DE AGUA Y NUTRICION DE CULTIVOS DE FLORES

Edgar Amézquita *

INTRODUCCION

El presente artículo reúne una serie de experiencias que el autor ha tenido durante su trabajo como asesor en manejo de suelos para el cultivo de flores. En él se discuten aspectos relacionados con la toma de agua por las plantas, se definen algunos términos y propiedades físicas que son de común ocurrencia en el vocabulario del personal que labora en flores, con el fin de uniformizar y de facilitar la toma de decisiones relacionadas con aplicaciones de agua o de soluciones nutritivas. Se enfatiza, además que los sustratos para flores son en su mayoría predominantemente macroporosos y que por lo tanto la redistribución del agua dentro de las camas tiende a ser vertical y poco horizontal o en forma de bulbo, lo que dificulta el uso de solo riego por goteo y el cual debe ser completado con aplicaciones de agua con manguera (poma).

El agua es el principal constituyente de los seres vivos. Una planta verde posee en su constitución entre un 90% y un 95% de agua. El porcentaje restante (10-5%) lo constituyen las cenizas, las cuales portan los elementos nutritivos. De esta distribución biológica surge el principio de la esencialidad del agua para las plantas.

En la producción de flores, la esencialidad del agua para obtener altos rendimientos es indiscutible, por cuanto el agua produce la hidratación e hinchamiento de las células y ambos fenómenos causan el crecimiento vegetal, por ello en floricultura es necesaria la relación de riegos frecuentes y eficientes.

El agua es además el vehículo de transporte de los elementos nutritivos desde el suelo hasta las raíces y desde éstas a toda la planta. Con el conocimiento, y con la puesta en práctica de estos dos criterios (esencialidad y vehículo de transporte) debe ser manejada el agua en el suelo en floricultura.

Quien maneja el riego debe estar consiente de que tiene en sus manos el factor responsable del 90% de la producción y de la calidad de las cosechas, por eso debe estar permanentemente informado del estado de humedad y de la succión del agua del suelo y de la hidratación de las plantas. Solo así puede controlar cualquier riesgo de deshidratación

de éstas, lo cual traería como consecuencia deficiencias en el transporte y distribución de las sustancias nutritivas, con la consecuente disminución en crecimiento y desarrollo y producción (Tabla 1).

La Tabla muestra que cuando la concentración de fósforo es baja (0.1 ppm) la cantidad absorbida de este elemento por 4 plantas (19.2 y 21.1 mg), no fue influida principalmente por la cantidad de agua transpirada absorbida: 0.7 ó 9.3 g de agua. Por el contrario, bajo alta concentración de fósforo (31 ppm) la cantidad absorbida de este elemento por las raíces y tallo, si fue influido por la cantidad de agua transpirada: 0.8 u 8.4 g. En el primer caso (0.8 g) la absorción total de fósforo de 14.1.9 mg y en el segundo caso (8.4 g) de 414 mg. De lo anterior, se concluye que ambas: cantidad de agua transpirada y concentración de nutrientes en la solución, son igualmente indispensables para la nutrición de las plantas.

En el proceso de transpiración, en el cual es regido por la demanda atmosférica imperante bajo los invernaderos, el agua debe moverse desde el suelo a las hojas y de éstas a la atmósfera en las cantidades que el déficit de saturación del vapor del agua de la atmósfera lo reclame.

Para que este proceso se realice sin limitaciones, debe haber en el suelo suficiente cantidad de agua y poseer éste rápida capacidad de transmisión de ésta (alta conductividad hidráulica no saturada), para que el movimiento se produzca a las velocidades creadas por la demanda atmosférica.

Tabla 1. Influencia de la transpiración en la absorción de fósforo para fresa.

Concentración de P en	0.1		31	
Agua transpirada (g)	0.7	9.3	0.8	8.4
P – Absorbido (mg/4pl)				
Raíz	7.5	9.6	62.1	123
Tallo	11.7	11.5	79.8	291
Total	19.2	21.1	141.9	414

Si falla en el suelo la disponibilidad del agua (cantidad) o su velocidad de movimiento (conductividad), la planta sufre deshidratación en menor a

* Físico de Suelos. CIAT. A. A. 6713, Cali - Colombia

mayor grado y por lo tanto se afecta negativamente la nutrición de la planta y su productividad.

Desde hace mucho tiempo se conoce que por el xilema la planta transporta en forma ascendente el agua y las sustancias nutritivas (sales inorgánicas y algunas sustancias orgánicas) hacia las hojas. Allí estas sustancias son utilizadas para formar sustancias orgánicas (fotosintetatos) de diferente grado de complejidad que bajan de nuevo a la raíz y que se distribuyen en la planta por los conductos del floema (Figura 1).

En los conceptos emitidos en el párrafo anterior, radica el principio de producción eficiente de cultivos, el cual en forma práctica se puede resumir

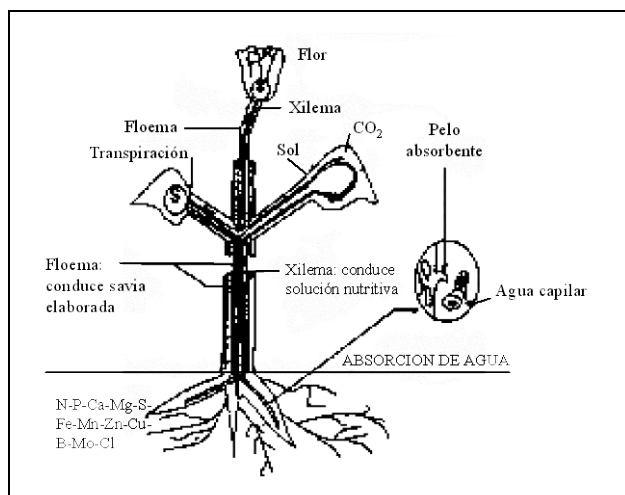


Figura 1. Esquema simplificado de la absorción y translocación de nutrientes.

así: por el xilema asciende la solución nutritiva (agua + nutrientes), en las hojas gracias al fenómeno de fotosíntesis se producen fotosintetatos que son distribuidos por el floema para nutrir las plantas y hacerlas producir.

Para que esto ocurra, es necesario que en ningún instante se presenten deficiencias ni nutricionales ni de agua a nivel de suelo. El manejo de suelos por eso tiene como uno de sus objetivos evitar que se presenten limitaciones en el proceso de absorción de agua y de nutrientes por las plantas.

El proceso de transferencia de agua (solución nutritiva) dentro del sistema suelo planta $\Rightarrow$ atmósfera es gobernado por fenómenos capilares y regido por principios de termodinámica y de cambios en el potencial hidráulico dentro del sistema. Para que el fenómeno de absorción de agua y de nutrientes se dé, es necesario que haya continuidad en el tamaño de los poros de la interface suelo – planta (xilema). Si falla la continuidad, falla la absor-

ción. Absorción es el proceso mediante el cual un elemento (M) pasa del sustrato (suelo, solución nutritiva) a cualquier parte de una célula viva (pared, citoplasma o vacuola).

Los requerimientos de agua por los cultivos, deben verse desde esta panorámica y por la influencia de las propiedades físicas del sustrato con los principios expuestos. Solo así, es posible solucionar los problemas de productividad y de calidad de los productos florales exportables.

DEFINICIONES UTILES PARA EL MANEJO DE SUELOS EN FLORICULTURA

Capacidad de Campo: Cantidad de agua (porcentaje de humedad) que queda en el suelo después de que éste ha sido mojado abundantemente y se ha dejado drenar por 48 horas evitando que haya pérdidas por evaporación. En suelos mezclados con cascarilla y con escoria o con ambas, la capacidad de campo se puede alcanzar después de 4 a 6 horas de haberse regado abundantemente por ser predominante macroporosos.

Punto de Marchitez: Cantidad de agua (porcentaje de humedad) que queda en el suelo después de que las plantas que en él crecen, mueran por deshidratación.

Punto de Marchitez Temporal o Punto de Marchitez Agronómico: Cantidad de agua o porcentaje de humedad que hay en el suelo cuando las plantas empiezan a mostrar síntomas de pérdida de turgencia por deshidratación a medio día, cuando se sucede la mayor intensidad lumínica y ocurren las más altas temperaturas.

Agua Util a Agua Disponible: Cantidad de agua que contiene el suelo y que puede ser utilizada por la planta. Desde el punto de vista práctico es la cantidad de agua que se almacena en el suelo entre capacidad de campo y punto de marchitez temporal. En éste volumen de agua se encuentra presente los nutrientes que utilizan las plantas, sea que provengan del suelo o de los fertilizantes, es la solución nutritiva del suelo.

Humedad Gravimétrica: Expresión porcentual de la cantidad de agua que posee el suelo expresada en función de peso. Está asociada con la textura y con la mezcla de mejoradores físicos (cascarilla y/o escoria) que se haya utilizado y con la frecuencia del riego. Es de poca utilidad agronómica.

Humedad Volumétrica: Expresión porcentual del contenido de humedad del suelo en función de volumen de agua sobre volumen de suelo. Es de gran utilidad agronómica porque permite llevar el contenido de humedad a términos de lámina de agua.

Lámina de Agua: Expresión del contenido de la humedad del suelo en términos equivalentes a altura de agua. Entre mayor sea la lámina a capacidad de campo, mayor es la disponibilidad de agua para las plantas y mayor la frecuencia entre riegos sucesivos.

Capacidad de Almacenamiento: Cantidad de agua que es necesario aplicar a un suelo para elevar su contenido actual hasta capacidad de campo.

Riego: Acción de aplicar agua a un suelo para elevar su contenido de humedad hasta capacidad de campo con el fin de que el cultivo disponga del máximo de agua aprovechable. Esta acción implica que haya mojamiento del suelo en la profundidad en que crecen las raíces.

Frecuencia de Riego: Período de tiempo generalmente en días, que debe transcurrir entre la aplicación de un riego y la necesidad de volver a aplicar otro. Es variable en época de lluvias o de verano.

Tiempo de riego: Tiempo que debe transcurrir para aplicar al suelo la cantidad de agua que éste requiere para llegar a capacidad de campo.

Aforo: Determinación de la cantidad de agua que por unidad de tiempo está entregando el sistema de riego al suelo bien sea por cacho, flauta, goteo, microaspersión, etc. Es indispensable hacer aforos diarios para poder saber con cuanta agua se riega cada cama. Por la falta de aforo se cometen muchos errores en riego y en fertirrigación.

Agotamiento de Agua: Disminución del contenido de agua del suelo en función de tiempo, por el uso que de ella hacen las plantas durante el proceso evapotranspirativo.

Perfil de Humedad del Suelo: Distribución del contenido de humedad del suelo en profundidad por capas u horizontes.

Fertirrigación: Aplicación de sales solubles que contienen los elementos nutritivos, en el agua de riego. Se cumplen dos principios fertilización y aplicación de agua.

Solución Nutritiva de Suelo: Medio acuoso en el cual se encuentran disueltos los nutrientes que debe tomar la planta. La dinámica del proceso de absorción de nutrientes de esta solución junto con la fotosíntesis, constituye los fenómenos básicos para el crecimiento, desarrollo y producción vegetal y, por lo tanto, del negocio de la agricultura.

Riego de Refrescamiento: riego que se aplica a las plantas recién sembradas o plantas en crecimiento, cuando la evapotranspiración es muy elevada a medio día, con el propósito de que no se deshidraten. Generalmente se aplica con poma. Las cantidades de agua que se utilizan son bajas.

Riego de Lavado: Cantidad de agua que es necesario aplicar en exceso de capacidad de campo para lavar las sales presentes en el suelo. Generalmente se utiliza un 25 a 50% de agua adicional.

Mojamiento del Suelo: Capacidad del suelo de imbibirse de agua y de transmitirla en profundidad cuando se riega. El riego cumple su objetivo cuando logra mojar el suelo. Es muy común encontrar suelos que a pesar de que se riegan no se mojan. Es indispensable que el técnico evalúe permanentemente la profundidad de mojamiento de su suelo y no confíe de que porque está regado está mojado el suelo.

Conductividad Hidráulica: Capacidad del suelo para transmitir el agua por su sistema poroso, tanto cuando el suelo está saturado (conductividad a saturación), como cuando no lo está (conductividad no saturada). La nutrición de las plantas depende mucho de la conductividad hidráulica no saturada y de la composición de la solución del agua del suelo.

Espacio Aéreo: Fracción de la porosidad total no ocupada por agua cuando el suelo está a capacidad de campo. Cuando un suelo está inundado su espacio aéreo es cero, cuando está totalmente seco, el espacio aéreo es igual a la porosidad total. Para flores un buen espacio aéreo a capacidad de campo debe estar entre 20% y 25%.

Densidad Aparente: Es la relación masa/volumen del suelo. Si la densidad aparente es alta (Ej.; 1.45 g/cc) el suelo está compactado y las raíces de las plantas no pueden crecer. Por el contrario un suelo de baja densidad aparente (Ej.; <1.0 g/cc) es un suelo ligero de alta porosidad que facilita la penetración de las raíces.

Porosidad Total: Es la relación que existe entre el volumen total de poros que tiene un suelo y el volumen de la parte sólida del mismo. Se calcula a partir de la densidad aparente y de la densidad de partículas. Una porosidad alta (Ej.: >55%) garantiza que el suelo es poroso. Pero no necesariamente su funcionamiento en relación con el crecimiento de las plantas, para ello es necesario dividir la porosidad total en clases de poros. Por ejemplo los macroporos son poros grandes que no retienen agua pero sirven para dar aireación al suelo, solo por ellos crecen las raíces. En los mesoporos se almacena “agua aprovechable” por las plantas, por lo tanto de su presencia y abundancia depende la nutrición constante y equilibrada de los cultivos. Los microporos no son importantes desde el punto de vista de agua por que son demasiados pequeños, pero en ellos, se realizan las reacciones de reducción del Fe y del Mn, los cuales son esenciales y asimilables en forma reducida.

Un buen suelo para floricultura debería contener alrededor de 20% - 25% de macroporos; 20% - 25% de mesoporos y 15% - 20% de microporos. Llegar a conseguir estas proporciones no es fácil, pero la filosofía de preparación de suelos y de camas debe tender a buscar ese fin. Como conclusión, debe tenerse en claro que no es solo la porosidad total, la propiedad que ayuda a obtener buenas cosechas, sino la distribución adecuada de los poros dentro de esa porosidad, la que determina el comportamiento nutritivo y funcional del suelo para las plantas de flores.

Perfil Cultural del Suelo: Es la descripción y cuantificación de las propiedades, químicas y biológicas, que presenta la parte superior del suelo, en relación con la capacidad del suelo para producir cosechas abundantes y rentables bajo determinadas condiciones de clima y de manejo.

APLICACIONES DE AGUA EN FLORICULTURA

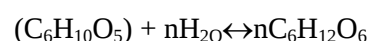
Importancia del agua para las plantas

Los organismos vivos por haberse originado y evolucionado en ambientes acuáticos, son absolutamente dependientes del agua: Sin la presencia del agua, la vida como se conoce, no existiría. El agua es esencial para las plantas por las siguientes razones:

- Es un constituyente primordial para el protoplasma celular, llegando a ocupar hasta 95%

de su constitución. Cuando el protoplasma se deshidrata, deja de ser activo y por debajo de cierto límite de contenido de agua muere. Esto ocurre, por que las sustancias orgánicas hidratadas (carbohidratos, proteínas, ácidos, nucleicos, etc.), que se hallan en el protoplasma cambian sus propiedades físicas y químicas al perder el agua.

- El agua participa directamente en numerosas reacciones químicas que ocurren dentro del protoplasma. Las reacciones de hidrólisis y condensación, son importantes en varios procesos metabólicos, tales como la interconversión de carbohidratos.



Almidón Glucosa

- El agua es el solvente en el cual muchas sustancias están disueltas y en el cual se llevan a cabo reacciones químicas.
- Gran parte del agua en las plantas, se presenta en las vacuolas siendo las responsables de mantener la turgidez de las células y por lo tanto de toda la planta.
- Las láminas delgadas y continuas de agua que rodean cada célula de la planta, crean microespacios entre el material sólido y la pared celular, permitiendo la entrada y movimiento de sustancias a través de la planta.
- El agua es el medio en el cual se mueve las sustancias disueltas en xilema y floema. Es el medio en el cual los gametos móviles efectúan la fertilización y en el que se sucede la diseminación de esporas, frutos y semillas,

El consumo de agua por los cultivos agrícolas normalmente se refiere a toda el agua perdida a través de las plantas por transpiración y gutación, del suelo por evaporación más el agua retenida en los tejidos vegetales.

El agua retenida por los tejidos vegetales es alta, sin embargo, es generalmente menor del 10% del total de agua evapotranspirada durante el ciclo de crecimiento de un cultivo. La figura 1, muestra diagramáticamente las cantidades relativas de agua transpirada, retenida y consumida por el maíz.

Agua del suelo

El agua en el suelo es retenida por fuerzas de adhesión, cohesión y capilaridad. El fenómeno de adhesión ocurre cuando láminas moleculares de agua se ponen en contacto con partículas del suelo, el de cohesión cuando más láminas de agua se unen a las láminas adheridas y el de capilaridad cuando las láminas cohesionadas encuentran los capilares (poros) del suelo.

Desde el punto de vista agrícola es interesante considerar tres tipos de tamaño de poros en el suelo; macro, meso y microporos. Por los primeros el agua se mueve libremente obedeciendo a la ley de gravedad. Son los poros de drenaje y de aireación del suelo. Por otro lado, son los poro por los cuales crecen los pelos radiculares, se constituyen así, en definitivos para permitir el desarrollo de las raíces y con ello de contribuir a la capacidad de absorción de agua y de nutrimento por las plantas.

En los segundos, los mesoporos, se almacena el agua aprovechable, la cual es definida como la cantidad de agua (volumen o lámina), que ocurre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). La capacidad de campo, es la máxima cantidad de agua (%) que un suelo puede retener contra la gravedad después de que se ha mojado abundantemente y ha drenado por 48 ó 72 horas. Preferiblemente debe determinarse en el campo con las condiciones de manejo de suelos de cultivos existentes.

El PMP se ha definido como la cantidad de agua presente en el suelo cuando un cultivo se marchita permanentemente. Involucra muerte en la planta en una atmósfera de alta humedad relativa (cerca al 100%). Agronómicamente debe determinarse el punto de marchitez temporal (PMT) que corresponde al contenido de humedad el suelo cuando los cultivos en el campo pierden la turgencia al medio día.

Usualmente estos puntos de humedad tan importantes, se han determinado en el laboratorio sometiendo muestras disturbadas o indisturbadas a equilibrio con presiones correspondientes a 0.3 (CC) y 15 (PMP) bares (30 y 1500 K Pa), sin embargo, esta metodología no puede ser tan precisa como hacerlo con las condiciones de campo y de manejo en que esté trabajando.

La interpretación agronómica del agua presente en los mesoporos, depende de qué tan grande es la diferencia de contenido de humedad volumétrica entre CC y PMT. Por ejemplo, un suelo que presente una diferencia de 20% tendrá una humedad aprovechable mayor que otro cuya diferencia sea

de 15%. Para fines prácticos de uso consuntivo estos valores deben convertirse a términos de lámina multiplicado la humedad aprovechable en términos unitarios (0.20 a 0.15) por la profundidad de enraizamiento.

Un ejemplo, ilustra mejor esta situación si para ambos casos se considera una profundidad de:

25 cm.

$25 \text{ cm.} \times 0.20 = 5.0 \text{ cm.}$

$25 \text{ cm.} \times 0.15 = 3.75 \text{ cm.}$

El primer suelo tendrá una lámina correspondiente a 5.0 cm., y el segundo de 3.75 cm. a una profundidad de 25 cm.

En la interpretación también debe tenerse en cuenta el clima o demanda atmosférica bajo la cual crece el cultivo.

Los microporos aunque son muy importantes desde el punto de vista mineralógico, no lo son desde el punto de vista agrícola funcional.

MOVIMIENTO DE AGUA DENTRO DEL SISTEMA SUELO - PLANTA - ATMOSFERA

El movimiento del agua dentro del sistema suelo-planta-atmósfera, obedece a diferencias de potencial de humedad entre los componentes de este sistema. El potencial de humedad en la atmósfera es creado por el comportamiento instantáneo de la humedad relativa. Cuando la humedad relativa es baja (medio día) se produce un potencial atmosférico más negativo y aumenta la demand transpirativa de los cultivos. Si la conductividad hidráulica del suelo y de la planta es alta el agua fluye dentro del sistema para suplir la demanda tranpirativa, pero si es baja, la rata de flujo es baja y la planta tiende a ceder agua de sus tejidos perdiendo su turgidez y originando el punto de marchitez temporal.

Una planta que pierde turgidez disminuye o anula su actividad fotosintética y por lo tanto, deja de producir materia verde afectándose negativamente los rendimientos.

TIPOS DE RIEGO EN FLORICULTURA

Riegos presiembra

En floricultura, dependiendo de qué tan fácil se moja el suelo y de las necesidades de agua que presentan los cultivos, de acuerdo a su estado de desarrollo, se deben dar riegos pesados que lleven el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo por lo menos hasta unos 20 cm. o 30 cm. de profundidad o suministrar riegos suaves o ligeros que ayuden a mantener el suelo a capacidad de campo.

En suelos con características de livianos o francos el riego presiembra puede ser pesado, pero en suelos de comportamiento arcilloso debe ser ligero para evitar que en la labor de siembra, se adhiera el suelo a las manos a los operarios y se dificulte la labor.

Después del riego de presiembra el suelo debe quedar mojado suficientemente (sin exceso) por lo menos hasta la profundidad que tengan las raíces de las plantas que se van a sembrar, para evitar que el prendimiento sea poco o no se dé por falta de mojamiento del suelo.

El riego de presiembra debe mojar al suelo en profundidad (es necesario evaluarlo en el campo) y debe ser hecho 2 ó 3 días antes de la siembra en suelos arcillosos y de 1 a 2 días antes de la siembra, en suelos livianos o medios.

El objetivo principal del riego presiembra es el de mojar el suelo en profundidad, para poderlo manejar en el futuro con riegos complementarios. EL riego presiembra puede hacerse con flauta o aspersión. En cualquiera de los casos debe evitarse que el agua aplicada golpee con alta intensidad la superficie del suelo para evitar el encostre superficial.

Riegos refrescantes

El riego de refrescamiento se hace en floricultura con el objetivo de mantener una humedad relativa alta alrededor de las plantas recién sembradas o estresadas, para que no se deshidraten. Este riego humedece muy superficialmente al suelo, el agua se pierde muy rápidamente por evaporación y no ayuda al mantenimiento de un buen nivel de humedad en el suelo (cercano a capacidad de campo) en profundidad.

El riego de refrescamiento es absolutamente indispensable en floricultura en las etapas de prendimiento y en los días calurosos (hacia medio día).

En ambos casos para controlar la deshidratación de las plantas y no para mojar el suelo. Puede hacerse con poma, flauta o aspersión, es un riego de corta duración que moja planta y superficialmente al suelo.

Riego de producción

Es el riego diario o interdiario que se aplica a los suelos que se cultivan con flores, para que las plantas dispongan de la cantidad adecuada de agua que necesitan para su crecimiento y desarrollo. El crecimiento de las plantas se basa en la hidratación, hinchamiento y estiramiento de las células, gracias al ingreso del agua absorbida por las raíces, la cual como se explica en la introducción es, además portadora de elementos nutritivos y otras sustancias indispensables para crecimiento y desarrollo de los vegetales.

El riego de producción debe cumplir con el objetivo de mantener tan permanentemente como sea posible el contenido de humedad del suelo a/o muy cerca de capacidad de campo. A capacidad de campo el agua es muy fácilmente tomada por las raíces y transportada a la parte aérea. A capacidad de campo la conductividad hidráulica no saturada, es la más alta que se puede poseer en el suelo, en condiciones normales de producción vegetal. Cuando el contenido de humedad del suelo disminuye de capacidad de campo, por haber sido absorbida por los cultivos, la conductividad hidráulica se hace menor y por lo tanto también la transmisión de agua del suelo hacia las raíces y se puede originar déficit de agua en las plantas.

Frecuencia de riego

La frecuencia de riego depende de sus objetivos. EL riego de refrescamiento debe hacerse tan frecuentemente como lo requieran las plantas recién sembradas o aquellas que estando en estado más avanzado de desarrollo productivo o vegetativo estén perdiendo su turgencia. La pérdida de turgencia es una manifestación de la alta demanda evaporativa impuesta por las condiciones climáticas de alta temperatura y alta luminosidad que se presentan en los invernaderos.

En el riego de producción, la dotación de agua debe ser permanente y siempre enfocada a devolver al suelo el agua necesaria para llevarlo de nuevo a capacidad de campo. En producción de flores, es conveniente hacer riegos diarios en lugar de hacerlos interdiarios a cada dos días. Inclusive hoy se tiende a hacer varios riegos cortos durante el día

(Figura 2 y 3). Las gráficas claramente muestran cuando se aumenta la frecuencia de riego, de un riego cada dos días a dos riegos diarios, los rendimientos del clavel se aumentaron más que cuando se incrementó la concentración de la solución de $\frac{1}{4}$ a 2, aunque para la combinación frecuencia - concentración siempre hubo efecto positivo.

La importancia de hacer riegos frecuentes, radica fundamentalmente, en que permanentemente se le está devolviendo al suelo el agua que ha sido tomada por los cultivo y por lo tanto, siempre tendrá agua disponible y por otro lado, en que teniendo el suelo buen contenido de humedad, no se disminuye

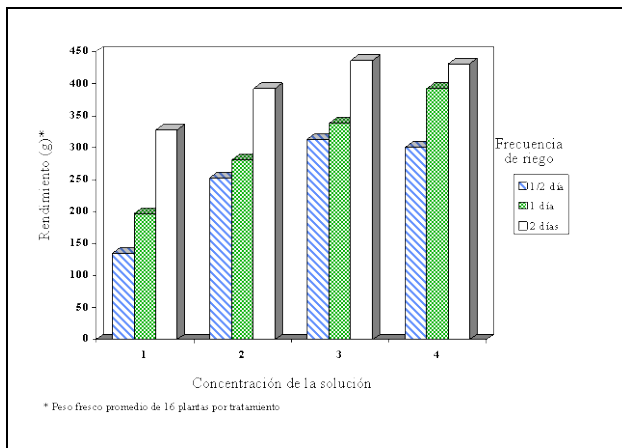


Figura 2. Influencia de la concentración nutritiva y de la frecuencia de riegos en los rendimientos de clavel.

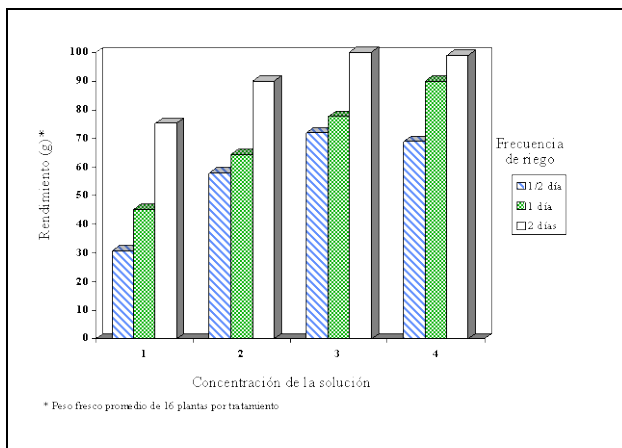


Figura 3. Influencia de la concentración nutritiva y de la frecuencia de riego en los rendimientos relativos del clavel.

Bogotá

tan drásticamente la conductividad hidráulica como cuando el suelo se seca.

Cantidad de agua en cada riego

La cantidad de agua que se debe suministrar en cada riego depende de la cantidad de agua consumida del riego anterior. El suelo tiene una capacidad de almacenamiento hasta capacidad de campo, el riego debe completar el agua actual, hasta restituir de nuevo el contenido a capacidad de campo.

Lo anterior lleva a concluir que si las condiciones climáticas imperantes son similares día tras día, los requerimientos de riego son iguales, pero si ellas son variables los requerimientos de riego también lo son. Se recomienda en días nublados aplicar menos cantidad de agua que en días brillantes.

En producción de flores está utilizando como criterio aplicar 1 m^3 por cama (30 m. X 1.3 m.) por semana. Aunque esto ha dado buenos resultados carece de un análisis mas profundo de utilización y eficiencia de uso de agua y de solución nutritivas. Posiblemente esa cantidad sea buena para algunos suelos y algunos cultivos pero no para todos los suelos y cultivos. Cuando se aplica semanalmente (7 días) 1 m^3 de agua se está haciendo una aplicación equivalente aproximada de 143 litros/día/cama o 3.96 mm/día, lo que equivaldría a la evapotranspiración diaria.

Calculo de la cantidad de agua para cada riego

La cantidad de agua a aplicar en cada riego (riego de producción) depende del consumo de agua (uso consuntivo) que haya habido desde la última vez que se regó, o sea, del agotamiento del agua del suelo desde el riego anterior el cual depende de la intensidad con que las fuerzas evapotranspiratorias hayan actuado sobre el sistema suelo-cultivo.

Hay dos formas técnicas de calcular la cantidad de agua que ha sido consumida:

1. Determinación del contenido actual de agua del suelo.
2. Determinación de la cantidad que se haya evapotranspirado desde el ultimo riego al momento actual.

Tabla 2. Datos obtenidos en suelos de la Sabana de

Profundidad cm	Capacidad de campo (%) θ_v	Punto de marchitez agronómico (%) θ_v	Agua aprovechable (%)	Lámina de Agua aprovechable	
				cm.	mm.
0-7	32	17	15	1.05	10.5
7-25	31	18	13	2.34	23.4
25-40	29	16	13	2.40	24.0

Nota: Capacidad de campo y punto de marchitez deben ser determinados directamente en las camas del cultivo.
 θ_v = Humedad volumétrica, % agua aprovechable = % CC - % PMA
 Lámina aprovechable = agua aprovechable/100 * profundidad

Se explicará cada uno de estos puntos:

Determinación del contenido actual de agua del suelo

A medida que pasa el tiempo desde el último riego, las plantas están tomando agua y nutrientes a cada instante durante el día para poder formar biomasa a través del proceso fotosintético. El agua disponible del suelo, la cual es absorbida por las raíces para ser transpirada, empieza a agotarse en función del tiempo y de la profundidad de acción de las raíces, hasta alcanzar valores tan bajos que ya las raíces no pueden absorberla, necesitando por lo tanto recargar de nuevo el agua consumida.

Supóngase que en la caracterización del perfil físico del suelo, se obtuvieron los datos de la tabla 2 (estos datos son comunes en camas con cascarilla en la Sabana de Bogotá):

Supóngase ahora que a las mismas profundidades se tomaran de humedad del suelo 3 días después de haber regado el suelo y de haberlo llevado a capacidad de campo y que se encontraron los siguientes contenidos de humedad gravimétrica: 32.5%, 26.8% y 19.5% respectivamente desde la capa superior a la más inferior. Se desea entonces saber cuánta agua en función de lámina se ha consumido y con cuánta agua debe regarse para llevar de nuevo el suelo a capacidad de campo. (Tabla 3)

Tabla 3. Cálculo de la lámina aplicar.

Prof. cm	C. de C (% θ_v)	Humedad actual (% θ_v)	Densidad aparente (g. cm ⁻³)	Humedad actual (% θ_v)	Humedad consumi- da (% θ_v)	Lámina consumi- da (cm)	Lámina consumi- da (mm)	Lámina a aplicar (mm)
0-7	32.0	31.5	0.70	22.05	9.95	0.69	6.97	6.97
7-25	31.0	35.8	0.75	26.85	4.15	0.75	7.50	7.50
25-40	29.0	35.4	0.82	29.02	0.00	0.00	0.00	14.77

Nota: Humedad gravimétrica (% θ_v) se determina en laboratorio
 Densidad aparente (Pa): se puede determinar % θ_v = % θ_w x Pa.

De lo anterior se puede concluir:

- Que en los tres días que han transcurrido se han consumido: 4.8 mm/día igual a 14.47/3.
- Que para volver a llevar el suelo a capacidad de campo es necesario aplicar después de tres días una lámina de 14.447 mm (14.47L/m²); 520 L/cama de 36 m².

- Que la lámina debe mojar el suelo hasta una profundidad de 25 cm, ya que a más profundidad el suelo permanece a capacidad de campo.
- Que para comprobar si el agua penetró a esa profundidad, es necesario chequear la profundidad de humedad con barreno de tubo hasta 25 cm.
- Que las raíces activas están consumiendo solución nutritiva (agua del suelo) de las dos pri-

meras capas: aproximadamente 1 mm de agua por cada cm. de suelo de la primera capa y 0.42 mm de agua por cm de suelo de la segunda capa.

El principal problema que surge cuando se hace muestreo para determinar el contenido de humedad actual del suelo es que debe transcurrir mínimo 24 horas para poder secar la muestra en laboratorio a $105^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$, es decir, que siempre habrá un retraso de un día respecto al conocimiento de la humedad actual.

Para evitarse este problema se han ideado aparatos, como los bloques en yeso, los de nylon y los tensiómetros, mediante los cuales una vez se hayan hecho correlaciones entre la humedad actual del suelo y la lectura correspondiente es estos aparatos, es posible conocer el porcentaje de humedad que servirá para hacer los cálculos.

Determinación de la cantidad de agua evapotranspirada

En agricultura tecnificada bajo riego, se han desarrollado una serie de formulaciones matemáticas que correlaciona la evaporación en tanque "A", con algunos de los parámetros climáticos que la determinan. Así, se ha determinado la evapotranspiración potencial para todos los sistemas de riego en el mundo. La degradación por salinidad de casi todos esos sistemas, muestra claramente que la consideración de los factores de suelo que tienen que ver con almacenamiento y transmisión de agua, es la principal causa de su falta de sostenibilidad. Con el propósito de obviar los problemas mencionados y de desarrollar nuevas metodologías para hacer un riego más eficiente es necesario hacer una caracterización física de suelo de las camas, mediante la cual es posible construir, un diagrama para el cálculo de lámina de riego a partir de los parámetros básicos de agotamiento de agua en función de tiempo y de evapotranspiración.

A manera de ejemplo, se presenta el monograma siguiente. En el lado izquierdo aparece el contenido de humedad prometido de capacidad de campo (30%) y de punto de marchitez temporal (19%) (Figura 4).

En la parte baja (horizontal) del gráfico aparece el número de días que transcurrirían para que se agote el agua disponible del suelo, en función de la demanda evaporativa, interpretada para días brillantes (ETP-7 mm/día), días claros (ETP 6mm/día) y normales (ETP 5mm/día). Hacia el lado derecho

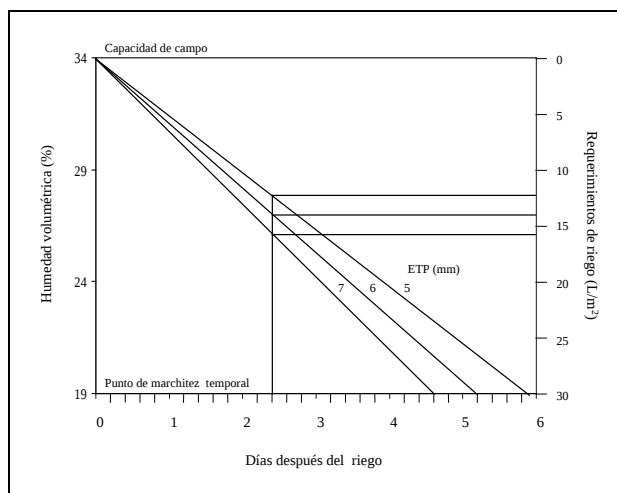


Figura 4. Requerimiento de riego.

aparece en la línea vertical la cantidad de agua expresada en función de mm/mm^2 que es necesario aplicar con el riego para devolver el contenido de humedad a capacidad de campo.

Ejemplo: supóngase que las camas se llevaron a capacidad de campo, aplicado 30 mm de agua/ m^2 ($30\text{mm} \times 30 \text{ m}^2 = 900\text{L/cama}$) después de que ellas habían alcanzado el punto de marchitez temporal (el dato de 30mm procede de la escala de la derecha) y que han transcurrido 3 días después del riego.

Se desea saber con cuánta agua es necesario regar si los días han sido normales (5 mm ETP), claros (6mm ETP) y brillantes (7 mm ETP).

Entrando por el eje de la "x" se encuentra el día 3, se traza una vertical que corte las líneas oblicuas de agotamiento de agua en términos de ETP que se ha estado presentando, se traza una paralela al eje "Y", donde esta paralela corta la vertical de la derecha se encuentra la cantidad de agua que por m^2 se debe aplicar, la cual multiplicada por el área de la cama, dará la dosis de riego a aplicar. En este caso, si los días son normales se debe regar cada 3 días con 15 L/m^2 , si son claros son 18 L/m^2 y si son brillantes con 21 L/m^2 .

Dentro de la metodología de determinar el agua evapotranspirada podría mencionarse la siguiente, que por su facilidad de aplicación puede implementarse:

En uno, dos o más bloques representativos de las condiciones de cada uno de los cultivos de flores que se proceden, poner por lo menos tres tinas grandes de 40 cm a 60 cm de diámetro por 25 cm a

35 cm de altura con agua y evaluar diariamente por medio de una regla graduada en mm, la cantidad de agua que se evaporó el día anterior.

Esta lectura debe hacerse a las 7 a.m. para que el director del cultivo o la persona que él designe haga los cálculos de cantidad de agua con que es necesario regar y de la orden correspondiente. El cálculo a hacer es el siguiente: basta multiplicar los milímetros perdidos por evaporación por el área de la cama, para obtener la cantidad de litros que hay que aplicar por cama ya que un mm. Evaporado equivale a 1l/ m².

La determinación diaria de la cantidad de agua perdida el día anterior, corresponde al agua evaporada y no a la evapotranspiración, que generalmente es menor por el efecto que la cobertura vegetal ejerce sobre la evaporación. Poco a poco el técnico del cultivo y asesor irán ajustando el efecto de la cobertura para condición específica de empresa y cultivo.

Para llegar a evapotranspiración es necesario multiplicar con el valor obtenido de evaporación por un coeficiente inferior a 1.0.

CUIDADOS ESPECIALES PARA EL RIEGO

La acción de regar es la que más repercute en la producción de los cultivos de flores. Hay una relación directa y altamente significativa entre agua disponible en el suelo con la fotosíntesis y la producción. Si no hay en el suelo suficiente agua disponible no habrá formación de biomasa y por lo tanto no habrá producción o será muy baja, por esto es por lo que debe darse especial cuidado a la práctica del riego. Los siguientes puntos deben tenerse en cuenta:

1. Calcular lo más acertadamente posible la cantidad de agua con que es necesario regar.
2. Asegurarse que esa agua entre efectivamente al suelo hasta una profundidad de 20 cm. y que no se pierda por escorrentía superficial para posteriormente mojar los caminos y no las camas.
3. Para que el agua entre efectivamente en el suelo, éste no debe presentar costras superficiales que proporcionen más la escorrentía que el mojado. Si el suelo está encostrado o se

encostra es necesario escarificarlo permanentemente.

El tiempo entre una superficie y la siguiente depende del suelo (estabilidad estructural) y de la intensidad con que se aplique el agua (golpe con que el agua impacta al suelo).

4. Para poder dosificar bien el agua que se va a aplicar es necesario hacer aforos permanentes hasta que se tenga seguridad de la cantidad de agua con que se riega.

Al aforo debe hacerse con plena conciencia y representatividad de las condiciones en que se está regando.

Cuando se riega por pomas, por aspersión o por microaspersión deben colocarse unos 10 recipientes de 10 cm. a 15 cm. de diámetro en varias posiciones para evaluar la cantidad de agua con que se está regando. La evaluación se hace en función del tiempo de riego. Los resultados obtenidos deben permitir el hacer los ajustes necesarios para poder aplicar con uniformidad la cantidad de agua que se ha planeado aplicar.

Cuando se riega con cacho o flauta se deben hacer aforos diarios. El técnico debe quedar satisfecho cuando en función de un tiempo dado se coseche en un tanque el volumen de agua correspondiente a ese tiempo.

A manera de ejemplo se presenta la siguiente tabla, pero el técnico debe elaborar su propia Tabla 4, para el sitio donde está regado. El aforo del ejemplo supone que se está utilizando un recipiente de 20 litros dependiendo de la apertura del registro se llena en 15, 20... 50 segundos, con estos datos se construye el cuerpo de la tabla asumiendo que el regador se demora 5, 6, 7 u 8 minutos regando una cama.

5. Solo se puede estar seguro de que se ha regado efectivamente, cuando después de haber aplicado la cantidad calculada en el tiempo planeado el agua ha mojado el suelo hasta 20 cm de profundidad, lo cual se puede comprobar mediante el barreno de tubo.

Si el riego no moja el suelo en profundidad no se ha regado

6. Si el suelo se moja en profundidad, los próximos riegos serán eficientes, como eficientes

serán todos los programas de fertilización que se hagan.

7. Un suelo que se humedece en profundidad no se saliniza o si esto ocurre es fácil de lavar.

Para lavar un suelo que se está salinizando es necesario aplicarle un 25% a 50% más de Agua que se requiere para lavarlo a capacidad de campo. A nivel de fondo de cama se exige que haya buen drenaje y buena evacuación del agua sobrante.

Tabla 4. Cálculo del tiempo de riego.

Recipiente (L)	Tiempo (seg.)	5min/cama	6min/cama	7min/cama	8min/cama
20	15	400	480	267	640
	20	300	360	350	480
	25	240	288	280	384
	30	200	240	233	320
	40	150	180	175	240
	40	120	144	140	192

FERTIRRIGACION

La fertirrigación básicamente consiste en la aplicación de elementos nutritivos en las aguas de riego. Para ello, se utilizan sales inorgánicas de alta solubilidad que contienen uno o más elementos nutritivos.

Con relación a la fertilización sólida la fertirrigación, tiene la ventaja de que los elementos aplicados van disueltos en el agua de riego y por lo tanto son rápidamente absorbidos y utilizados por las plantas, permitiendo, además, solucionar rápidamente problemas de deficiencias específicas. Sin embargo, es necesario aclarar que el funcionamiento del suelo como medio para el desarrollo de las plantas, intervienen varias formas en las cuales se presentan los elementos nutritivos, resumidamente ellas son: no intercambiables, intercambiables y en solución. La fertirrigación aumenta el contenido de los nutrientes en la solución, pero poco o muy poco los contenidos intercambiables y posiblemente menos aún los no intercambiables.

La fertilización sólida incrementa las cantidades intercambiables y las presentes en la solución y es más o menos eficiente dependiendo de si hay suficiente cantidad de agua disponible en el suelo para disolver y movilizar los elementos nutritivos hacia la raíz o si esa cantidad es insuficiente, en cuyo caso la eficiencia de la fertilización es muy baja. Se requiere entonces, como se afirma en la introducción, que los nutrientes estén disueltos en el agua del suelo (solución nutritiva) para que puedan moverse hacia las raíces y ser tomados y utilizados por las plantas.

Se conoce tres formas mediante las cuales los nutrientes llegan a ponerse en contacto con las raíces. (Figura 5).

1. Intercepción por las raíces.
2. Flujo en masa.
3. Difusión.

Intercepción por las raíces

En este proceso, las raíces a medida que van creciendo por el espacio poroso del suelo (macroporos) van encontrando nutrientes disponibles, los cuales son absorbidos por ellas, en las cantidades que ellas en un momento dado de su crecimiento y desarrollo lo requieren. Esto implica que en el suelo debería haber homogeneidad en la distribución de los elementos nutritivos respecto a cantidades.

En fertirrigación, cuando se hace una buena aplicación de riego (uniformidad horizontal, vertical y calidad de la solución nutritiva respecto a los requerimientos nutricionales) y éste baña las raíces activas de las plantas se produce este tipo de contacto ion-raíz y los nutrientes son absorbidos y utilizados de acuerdo a las necesidades selectivas de las plantas.

Cuando se ha hecho fertilización sólida, los nutrientes que estaban en forma intercambiable, van pasando a la solución del suelo a medida que éste va humedeciéndose por acción del riego y van mojando las raíces, las cuales, al ponerse en contacto con la solución nutritiva producida por mojamiento del suelo, absorben los nutrientes requere-

ridos de acuerdo al estado de su desarrollo fisiológico.

La descripción de la manera como actúan los sistemas de fertilización sólida y líquida permiten concluir que son complementarios. La fertilización sólida al ir a ocupar parte de las posiciones intercambiables disponibles dentro de la capacidad de intercambio de cationes de los suelos, se constituye en un sistema de reserva de nutrientes disponibles, susceptibles a pasar a la solución nutritiva procedente de la fertirrigación permita, por la concentración de nutrientes dentro de ella y por la disponibilidad de potenciales químicos, ser enriquecida por nutrientes que estén en posiciones intercambiables.

En la terminología científica se utilizan dos términos para designar los nutrientes que se hallan en forma intercambiable y de aquellos que se encuentran en la solución. Estos términos son: cantidad e intensidad respectivamente. Junto con ellos se utilizan los términos: capacidad y tasa, que se refieren, el primero a la relación entre la cantidad y la intensidad y el segundo, a la cantidad de ion que en una unidad de tiempo se libera a una unidad de volumen solución.

Flujo en masa

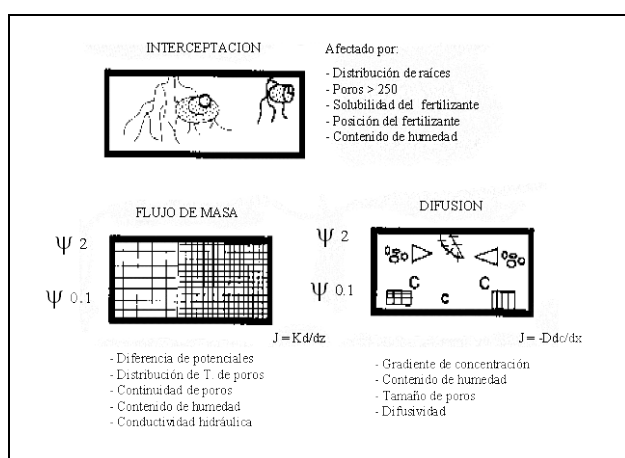


Figura 5. Procesos mediante los cuales se sucede el contacto Ion-raíz.

Mediante el proceso de flujo en masa los iones (elementos nutritivos en forma iónica) se desplazan de un sitio a otro donde son absorbidos por la raíz por diferencia de potenciales hídricos. Cuando una raíz activa está absorbiendo agua (solución) para transpirarla, obedeciendo a la demanda hídrica creada por la atmósfera, alrededor del área de influencia de la raíz se produce una disminución con el contenido de agua en ese volumen de suelo,

disminuyéndose el potencial hídrico. Como en este volumen el suelo quedará más seco, el agua de los lugares circunvecinos más húmedos (de mayor potencial hídrico) tenderá a moverse en la dirección; húmedo $\Rightarrow$ seco para tratar de equilibrar la diferencia entre potenciales. A medida que el agua se mueve arrastra consigo todos los elementos nutritivos que en ella se encuentran disueltos los cuales serán tomados por las plantas.

Las cantidades de nutrientes tomados por la planta por flujo en masa, está relacionado con el uso consuntivo de ésta y con la concentración de nutrientes en la solución (factor intensidad) y son afectadas negativamente por la disminución en la conductividad hidráulica a medida que el suelo va secándose por evapotranspiración.

La cantidad de elementos que pueden entrar en contacto con la raíz mediante este proceso, puede ser expresado de la siguiente manera:

$$Q_{fm} = [M] v$$

Donde:

Q_{fm} : Flujo en masa

$[M]$: Concentración del elemento en la solución del suelo

v : Volumen de agua absorbido por el cultivo

Teóricamente el flujo de masa se sucede por los mesoporos del suelo, en los cuales se almacena el agua útil o disponible por la planta, aquellas que en la práctica se determina por la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Cuando el suelo está a capacidad de campo y sobre él crece un cultivo, a medida que avanza la evapotranspiración el suelo se va secando y se van produciendo gradientes de potencial hídrico que originan el movimiento del agua en flujo de masa y con ella el flujo de los nutrientes.

Un suelo productivo debe entonces contener un buen volumen de mesoporos y una buena conductividad hidráulica aún a contenidos de humedad cercanos a punto de marchitez temporal para que el flujo de masa sea lo más constante posible.

El flujo masal, se afecta negativamente cuando el suelo se va secando, por ello cuando ocurre es necesario regar de nuevo, de aquí nace el concepto que se conoce como frecuencia de riego, el cual se asocia a cantidad o lámina de riego necesario para llevar de nuevo el suelo a capacidad de campo.

Difusión

El fenómeno de difusión expresa el proceso mediante el cual un ion o nutrimento se mueve desde un sitio donde está más concentrado hacia otro donde está menos concentrado, utilizando como medio para desplazamiento el agua contenida en los poros del suelo.

Lo anterior quiere decir que el movimiento de iones por difusión se debe a gradientes de potencial químico dentro de la solución del suelo, creados precisamente por absorción diferencial de iones por las raíces de las plantas.

El proceso de difusión es afectado dentro del suelo por la porción de volumen de poros llenos de agua, por la tortuosidad del sistema poroso y por otros factores físicos y químicos del suelo y de la solución que usualmente se agrupan dentro del concepto de coeficiente de difusión.

Comparativamente con los otros procesos de movimiento de iones, la difusión es el más lento, pero es igualmente importante en el proceso nutricional, porque los iones permanentemente se difundan aún a bajos contenidos de humedad del suelo. Los procesos de interceptación y flujo de masa al requerir mayores contenidos de humedad en el suelo, ocurren con menos frecuencia que la difusión, que es permanente.

VENTAJAS DE LA FERTIRRIGACION

- Ahorro de fertilizantes, porque éstos se aplican en las proximidades de las raíces, procurando-se que no haya pérdidas ni por volatilización y no por lixiviación.
- Mejor asimilación de los nutrientes aplicados por cuanto se aplican en forma solubles y con suficiente cantidad de agua como para que las plantas los puedan absorber rápidamente.
- Facilita la adecuación del fertilizante a las necesidades momentáneas a nutrición de las plantas. Por ejemplo, facilitaría la aplicación rápida y oportuna de Nitrógeno, Fósforo, Potasio u otros elementos y de combinación de ellos.
- Facilita la correlación rápida de síntomas carenciales específicos, por ejemplo, una deficiencia de N o de cualquier otro elemento, cu-

yo síntoma aparezca, se puede corregir rápidamente.

- Hay cierta economía en la distribución de los fertilizantes; aunque esto depende del costo de amortización de los equipos de aplicación que se compren. Una de las formas de ayuda a la amortización es utilizando los equipos, además en otras actividades: aplicación de insecticidas, fungicidas, etc.

LIMITACIONES DE LA FERTIRRIGACION

- Obstrucciones en las tuberías o en los emisores causadas por incompatibilidades químicas entre las sales utilizadas para preparar las soluciones o entre las sales y calidad de agua para riego.
- Aumento excesivo en la salinidad del agua para riego por uso inadecuado de altas dosis de sales nutritivas.
- Corrosión, muchas de las sales utilizadas en fertirrigación son corrosivas y tienden a dañar las tuberías e implementos metálicas que se utilizan en las redes de distribución.
- Reacción de los fertilizantes en la red de distribución, lo cual causa que se entregue a los cultivos una solución nutritiva diferente a la planeada como necesaria para ellos.
- En algunos sistemas de aplicación de la fertirrigación, como en el riego por goteo, se presentan demasiadas irregularidades en la aplicación uniforme de las soluciones, quedando por lo tanto áreas regadas y otras sin regar. Siempre que se utilice ese sistema de riego, es necesario complementarlo con riego con flauta o con cacho para no crear deficiencias ni de agua ni de nutrientes.
- Como en fertirrigación se usan sales puras es necesario conocer que se deben aplicar en los programas de fertirrigación todos los elementos nutritivos macro, secundarios y microelementos para no tener problemas de carencia.

COMPATIBILIDAD QUIMICA

Para la preparación de la solución madre es necesario conocer la compatibilidad o incompatibilidad de fertilizantes a usar para no provocar reacciones

químicas que al final arrojan resultados diferentes a los esperados o planeados para nutrir un cultivo. Así mismo, es necesario conocer sobre antagonismos y sinergismos nutritivos y sobre la acidez o basicidad de la solución resultante.

La incompatibilidad más importante, se produce cuando la mezcla de fertilizantes origina precipitaciones en la solución madre. Con el fin de prevenir situaciones desagradables y soluciones ineficaces se presenta en la Figura 5 anterior, la cual muestra las compatibilidades e incompatibilidades de los fertilizantes más comunes.

Tabla 5. Compatibilidad química de la mezcla de fertilizantes.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 Nitrato amónico	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2 Urea		C	L	L	C	C	C	C	C	C
3 Sulfato amónico			C	C	C	C	C	C	C	I
4 Superfosfato triple				C	L	C	C	C	C	I
5 Superfosfato simple					L	C	C	C	C	I
6 Fosfato diamónico						C	C	C	C	I
7 Fosfato monoamónico							C	C	C	I
8 Cloruro potasio								C	C	C
9 Sulfato potásico									C	I
10 Nitrato potásico										C
11 Nitrato calcico										

I = Incompatible
C = Compatible
L = Compatibilidad limitada

Para prevenir riesgos de incompatibilidad no deben mezclarse sales que aporten calcio (Ca) con aquellas que aporten sulfatos (SO_4^{2-}) o fosfatos (HPO_4^{2-}). Por ejemplo, si es necesario aplicar CaNO_3 , fertilizante de alta solubilidad, éste no se puede mezclar con un fertilizante fosforado, e inclusive conviene tomar como precaución aplicar el fosforado dos días después de CaNO_3 .

PREPARACION DE SOLUCIONES

Para el calculo de soluciones que contengan N-P-K, se aconseja:

1. En función del contenido de K calcular la cantidad necesaria de KNO_3
2. En función del contenido de P, calcular la cantidad requerida de fosfato diamónico o monoamónico.
3. Si se utiliza fosfatos diamónicos es necesario rebajar el pH hasta 6.3 con HNO_3 a una razón aproximada de 1.3 Kg de ácido nítrico por cada kilogramo de fosfato diamónico.

4. Al nitrógeno necesario se le resta el aportado por KNO_3 por el fosfato y por el HNO_3 la diferencia se aporta como NH_4NO_3 .

En la práctica se aconseja hacer lo siguiente:

1. Añadir lentamente el ácido nítrico al agua
2. Añadir el KNO_3 requerido
3. Añadir el fosfato diamónico o monoamónico
4. Añadir el NH_4NO_3
5. Agitar al menos durante 15 minutos

La concentración de la solución en agua no debe exceder de 700 ppm. La primera fase de cada riego y especialmente la última deben realizarse con agua sola para evitar obturaciones en los emisores y poder contar con suelo húmedo para una mejor distribución de nutrientes.

ABONOS UTILIZADOS EN FERTIRRIGACION

Dos requisitos muy importantes deben cumplir los fertilizantes que se utilicen para fertirrigaciones.

- Solubilidad
- Pureza

Las sales nutritivas a utilizar deben ser de alta solubilidad y ser con otras y con el agua de riego. Así mismo, debe presentar alta pureza para poder aplicar las cantidades que se requieren.

La alta solubilidad y el alto grado de pureza generalmente conducen a la obtención de soluciones con alto grado de salinidad que a través del tiempo pueden llegar a salinizar parcial o totalmente al suelo o al sustrato de crecimiento de las flores.

En la Tabla 6 se hace un muestreo de l conductividad eléctrica (mmhos/cm) que producen algunas de las sales utilizadas en la preparación de soluciones nutritivas.

Tabla 6. CE máximas debido a la presencia de varias sales nutritivas

Sal	P. Equiv.	G/L	meq/L	CE mmhos/cm
MgSO ₄	60.19	262.00	4352	363.0
CaSO ₄	68.07	2.04	30	2.5
NaCl	58.45	318.00	5440	453.0
MgCl ₂	47.62	353.00	7413	618.0
CaCO ₃	50.00	---	10	0.8

Algunas características de las sales más comunes utilizadas en fertirrigación se muestran a continuación:

Acido Nítrico: Se usa más para acidificar aguas de riego y para limpieza de tuberías, que para fertilización debido a las dificultades que su carácter ácido comunican a su manejo.

Nitrón-26: Solución concentrada de nitrato de amonio muy útil para la preparación de soluciones portadoras de N.

Urea: Es un compuesto soluble de alto contenido de nitrógeno más móvil que las sales amoniacales por ser menos absorbida por el suelo que éstas.

Nitrato de calcio: Se emplea más para aportar calcio que para aportar nitrógeno el grado greenhouse es altamente soluble, no así el grado agronómico. En general no debería aplicarse por goteo para evitar obturaciones y posteriores precipitaciones.

Fosfato monoamónico (MAP): Tiene buen contenido de P₂O₅ (60%) y de reacción ácida por lo cual disminuye el riesgo de obturaciones.

Fosfato diamónico (DAP): Da reacción ligeramente alcalina, por lo que se recomienda su utilización junto con un ácido, generalmente ácido nítrico 1.3 Kg por 1 Kg de fosfato diamónico.

Acido fosfórico (H₃PO₄): Su concentración varía entre el 50% y el 85%, puede utilizarse para acidular, su manejo tiene que ser cuidadoso.

Sulfato de Potasio: Es un producto de no muy alta solubilidad (102 g/L) pero aportante de azufre.

Cloruro de Potasio: Es una sal neutra de buena solubilidad (326 g/L).

Nitrato de Potasio: Es una sal neutra de buena solubilidad (257 g/L) que presenta un buen sinergismo entre el nitrógeno y el potasio.

Fosfato de monopotasio: Es una sal doble de buena solubilidad (148 g/L), útil por su poder de sinergismo entre los dos nutrientes.

Sulfato de amonio: Sal de alta solubilidad (742 g/L) muy útil para usarla en suelos alcalinos.

Cálculos

Para la elaboración de soluciones es necesario recordar que 1 ppm es equivalente a 1 gramo por 1 m³ o a 1 mg por 1 litro.

Ejemplo, calcular las cantidades de fertilizantes que se requieren para preparar una solución madre que contenga: 220 ppm de N y 180 ppm de K por cada metro cúbico de riego que se aplique, sabiendo que se debe preparar una solución para 20m³, y se van a utilizar KNO₃ y nitrato de amonio como fuentes solubles.

Solución:

1. Composición del KNO₃: 13-0-46
Composición del NH₄NO₃: 26-0-0

2. Reducción del K_2O a K: $45\% \cdot 1.2 = 38\%$ de K
3. Cantidad de K requerida por una solución madre de 1 m^3 que se utilizara para disolver en 20 m^3
 $100/38 \cdot 180 \cdot 20 = 9.424\text{ g} = 9.42\text{ Kg}$
4. Cantidad de N que porta el KNO_3
 $9424 \cdot 13/100 = 1225\text{ g}$. En 20 m^3
 $1225/20 = 61.3\text{ g de N/m}^3 = 61.3\text{ ppm}$
5. Nitrógeno faltante:
 $220 - 61.3 = 158.7\text{ ppm} = \text{g/m}^3$
6. Nitrógeno requerido para una solución madre de 1 m^3 que se disolvería a 20 m^3
 $100/26 \cdot 158.8 \cdot 20 = 12.207\text{ g/m}^3$
7. Conclusión: Para prepara una solución madre de 1 m^3 que se inyecte a un sistema de riego que guarde una relación de 1:20 se requieren: $9.42\text{ Kg de } KNO_3$ y $12.20\text{ Kg o L. De } NH_4NO_3$ para obtener una concentración de N de 220 ppm y una de K de 180 ppm .
4. Es necesario hacer chequeos frecuentes de la relación inyección – irrigación por medio de aforos para poder estar seguros que las dosificaciones son las correctas.
5. Cuando se duda que la solución nutritiva contenga las dosis de nutrientes planeadas es necesario tomar muestras para análisis químicos.
6. Los siguientes parámetros deben analizarse: CE, pH, NO_3 , NH_4 , P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, B, SO_4 , CO_3 , HCO_3 y Cl.

Hacer análisis cada 3 a 4 meses de las soluciones nutritivas en un buen método de chequeo, sobre todo en relación con incompatibilidad que se puedan presentar dentro de la red.

PRECAUCIONES EN LA PREPARACION DE LAS SOLUCIONES.

1. Elaborada la tabla de cálculo de requerimientos de cada fertilizante se procede a la pesada de productos por bloque o por dosificación de riego. La pesada de productos por bloque o por dosificación de riego. La pesada de productos debe ser cuidadosa para no cometer errores de dosificación así mismo, el almacenista debe anotar la fecha de entrega de los fertilizantes, la cantidad que de cada cual se entrega, en bloques y número de camas o en cuales se aplicarán y quedará un archivo las entregas para futuros chequeos.
2. El operario que va a prepara la solución, debe hacer una premezcla de balde grande para disolver los fertilizantes en poco agua. Una vez disueltos en el balde puede vaciarlos en el tanque y continuar agitando para evitar precipitaciones por gravedad o por formación de nuevos productos. Aún en las fincas donde la agitación es automática es necesario hacer las premezclas en baldes.
3. En el tanque de inyección la agitación debe ser permanente para conservar al máximo la homogeneidad de la solución que se está aplicando.

APLICACION DE NUTRIENTES CON EL AGUA DE RIEGO

John Clapp*

INTRODUCCION

La práctica de aplicar nutrientes a través de los sistemas de riego, conocida como fertigación, se utilizó desde la década del 1930. El amoníaco anhidro se aplicaba de esta forma antes que estén disponibles en el mercado los fertilizantes líquidos (Ransdell, 1968). El uso de la fertigación se expandió rápidamente a partir de 1950 cuando aparecieron las fuentes de nitrógeno que no necesitan almacenamiento bajo presión.

Hoy en día, aplicación de nutrientes a través de los sistemas de riego es uno de los métodos más eficientes de fertilización. Esta forma de manejo de los fertilizantes permite incrementar los rendimientos y reduce el potencial de problemas ambientales, tales como la escorrentía de los fertilizantes aplicados al voleo sobre la superficie del suelo, o la contaminación de la tabla de aguas con nitratos, debido a la aplicación de altas dosis de nitrógeno en una sola aplicación durante el ciclo del cultivo.

Algunos de los aspectos relevantes a considerarse en el manejo de la fertigación son:

1. Calidad del agua de riego
2. Movilidad de los nutrientes
3. Calendario de demanda de los nutrientes por el cultivo
4. Solubilidad de los fertilizantes

CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

El agua utilizada para riego puede contener sales disueltas, que cuando están presentes en altas cantidades pueden afectar el crecimiento de la planta. Pueden estar presentes cationes como sodio, calcio, magnesio, potasio y aniones como sulfato y carbonato.

La calidad del agua se evalúa basándose en el nivel y composición de las sales disueltas (Western Fertilizer Handbook, 1995). El contenido de sales se reporta como conductividad eléctrica (CEa) y se expresa en decisiemens por metro (dS/m) o milimhos por centímetro (mmhos/cm). El contenido total de sales o sólidos totales disueltos (STD) se reporta en mg/L o ppm. A medida que el contenido de

sales se incrementa mayor es el potencial de efectos nocivos en el cultivo. Las características de la calidad del agua y los problemas asociados con su uso en los cultivos se describen en la Tabla 1.

El contenido de sales del agua de riego puede influenciar el crecimiento en diferente forma ya que entre los cultivos existe un amplio rango de tolerancia. El potencial de reducción del rendimiento de diferentes cultivos, como efecto del contenido de sales del agua, se presenta en las Tablas 2, 3 y 4. Cultivos como trigo, algodón y remolacha son más tolerantes a altos contenidos de sales que fréjol, cebollas y fresas.

Tabla 1. Parámetros de calidad del agua de riego.

Caract.	Unidades	Grados de restricción		
		Ninguno	Leve a moderado	Severo
CEa	dS/m	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TSD	mg/L	<450	450-2000	>2000
Sodio	meq/L	<3	<3	-
Cloro	meq/L	<3	>3	
Boro	meq/L	<0.7	0.7-3.0	>3.0

Tabla 2. Potencial de reducción del rendimiento en relación a la calidad del agua (cultivos anuales).

Cultivo	Nivel de CEa para reducción rendimiento de:			
	0%	10%	25%	50%
Fréjol	0.7	1.0	1.5	2.4
Maíz	1.1	1.7	2.5	3.9
Arroz	2.0	2.6	3.4	4.8
Sorgo	2.7	3.4	4.8	7.2
Soya	3.3	3.7	4.2	5.0
Trigo	4.0	4.9	6.4	8.7
Algodón	5.1	6.4	8.4	12.0

Tabla 3. Potencial de reducción del rendimiento en relación a la calidad del agua (hortalizas).

--

* Director técnico de Tessengerlo, Inc.

Cultivo	Nivel de CEa para reducción rendimiento de:			
	0%	10%	25%	50%
Zanahoria	0.7	1.1	1.9	3.1
Cebolla	0.8	1.2	1.8	2.9
Lechuga	0.9	1.4	2.1	3.4
Papa	1.1	1.7	2.5	3.9
Calabaza	1.7	2.2	2.9	4.2
Tomate	1.7	2.3	3.4	5.0
Remolacha	2.7	3.4	4.5	6.4

Tabla 4. Potencial de reducción del rendimiento en relación a la calidad del agua (frutas).

Cultivo	Nivel de CEa para reducción rendimiento de:			
	0%	10%	25%	50%
Fresas	0.7	0.9	1.2	1.7
Aguacate	0.9	1.2	1.7	2.4
Uvas	1.0	1.7	2.7	4.5
Durazno	1.1	1.4	1.9	2.7
Naranja	1.1	1.6	2.2	3.2

La calidad del agua es aún más importante en los sistemas de riego de bajo volumen, como el goteo y la microaspersión, que requieren de orificios pequeños para el paso del agua. En estos casos el agua debe ser filtrada para remover las partículas sólidas. Las sales disueltas, aún las añadidas como fertilizantes al agua, pueden también cristalizarse alrededor de los orificios y reducir el flujo o taponarlos completamente.

El taponamiento de los orificios en los sistemas de riego de bajo volumen puede estar relacionado con muchos factores algunos de los cuales se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Potencial de taponamiento en los sistemas de riego por goteo.

Tipo de problema	Potencial de taponamiento		
	Leve	Leve a moderado	Severo
Sólidos suspendidos (mg/L)	<50	50-100	>100
pH	<7.0	7.0-8.0	>8.0
Sólidos disueltos (mg/L)	<500	500-2000	>2000
Población de bacterias (Nº/ml)	<10000	10000-50000	>50000

APLICACION DE FERTILIZANTES

Para evitar el taponamiento de los sistemas de riego los fertilizantes deben ser muy solubles y compatibles con el agua de riego. Se ha demostrado que los fertilizantes líquidos estables funcionan bien en todos los sistemas de riego. Los fertilizantes sólidos también se usan ampliamente, pero éstos deben solubilizarse sin dejar residuos de arcillas o cera.

Los fertilizantes sólidos varían apreciablemente en solubilidad como se observa en la Tabla 6.

Los fertilizantes líquidos claros son adecuados para aplicación a través de los sistemas de riego, especialmente los de bajo volumen. Estos productos pueden introducirse en el sistema con equipo mínimo, ahorrando tiempo ya que los nutrientes, presentes en forma soluble, están listos para el uso. Algunos productos usados actualmente en riego a bajo volumen son soluciones urea-nitrato de amonio, ácido fosfórico y tiosulfato de potasio.

FERTILIZANTES LÍQUIDOS DE ESPECIALIDAD

La compañía Tessenderlo Kerley es al momento el fabricante más grande de fertilizantes líquidos de especialidad en el mundo. Desde la fabricación del polisulfito de amonio- hidróxido de amonio y el tiosulfato de amonio en la década de 1950, la línea de fertilizantes líquidos de especialidad a continuado expandiéndose a través del desarrollo de nuevos productos (Clapp, 1998). Además de ser el más grande fabricante de tiosulfato de amonio (THIO-SUL) del mundo, Tessenderlo Kerley también se ha convertido en el fabricante más grande de tiosulfato de potasio (KTS).

Tabla 6. Solubilidad de los fertilizantes sólidos.

	Fórmula	Temperatura °C	Solubilidad g/100ml
Fuentes de Nitrógeno			
Nitrato de amonio	34-0-0	0	18.3
Polisulfato de amonio	20-0-0		Alto
Sulfato de amonio	21-0-0	0	70.6
Tiosulfato de amonio	12-0-0		Muy alto
Amoniaco anhidro	82-0-0	15	38.0
Agua amoniacal	20-0-0		Alto
Nitrato de calcio	15.5-0-0	17	121.2
Urea	46-0-0		100.0
Urea-ácido sulfúrico	28-0-0		Alto
Urea- nitrato de amonio	32-0-0		Alto
Fuentes de Fósforo			
Fosfato de amonio	8-24-0		Moderada
Polifosfato de amonio	10-34-0		Alta
Acido fosfórico verde	0-52-0		45.7
Acido fosfórico blanco	0-24-0		45.7
Fuentes de Potasio			
Cloruro de potasio	0-0-60	20	34.7
Nitrato de Potasio	13-0-44	0	13.3
Sulfato de potasio	0-0-50	25	12
Tiosulfato de potasio	0-0-25-17 S		150
Micronutrientes			
Borax	11% B	0	2.1
Acido bórico	17.5% B	30	6.35
Solubor	20% B	30	22
Sulfato de cobre	25% Cu	0	31.6
Yeso	23% Ca		0.241
Sulfato de hierro	20% Fe		15.65
Sulfato de magnesio	9.67% Mg	20	71
Sulfato de manganeso	27% Mn	0	105.3
Molibdato de amonio	54% Mo		43
Sulfato de zinc	36% Zn	20	96.5
Quelato de zinc	5-14% Zn		Muy soluble
Quelato de manganeso	5-12% Mn		Muy soluble
Quelato de hierro	4-14% Fe		Muy soluble
Quelato de cobre	4-14% Cu		Muy soluble

En 1993, la compañía compró de Arcadian Corporation la tecnología de nitrógeno triazone de lenta liberación. Esta forma de nitrógeno se usa en la formulación de varios fertilizantes líquidos utilizados para aplicaciones foliares y en fertigación. Algunos de estos productos y sus características se presentan en la Tabla 7.

Estos productos han sido evaluados en varios experimentos de campo, en aplicaciones vía sistemas

de riego. Zink (1998) reportó un significativo incremento en el rendimiento de papa cuando se aplicó tiosulfato de potasio (KTS) a través de un sistema central de riego por pivot, en el valle de San Luis, Colorado, E.U. Esta evaluación incluyó la adición de KTS a la dosis de potasio, como cloruro de potasio, recomendadas en los últimos tres años. Estos datos se resumen en la Tabla 8 y demuestran que la aplicación de KTS a través del sistema de riego incrementó los rendimientos de

papa en un promedio de 12% en un período de tres años.

Un estudio similar con algodón se inició en 1997 en Missouri, E.U. Los resultados preliminares se presentan en la Tabla 9. Otro experimento conducido en el estado de New York, E.U. evaluó el efecto de la aplicación de tres fuentes de potasio en árboles de manzana con riego por goteo. Los resultados del primer año de evaluación se presentan en la Tabla 10.

En North Carolina, E. U. se condujo también otro experimento para evaluar fuentes de nitrógeno y

potasio en la producción de tomate irrigados por goteo. Los tratamientos y los resultados se presentan en la Tabla 11. Los fertilizantes líquidos TRISERT-CB y KTS trabajaron muy bien en este sistema y obtuvieron los rendimientos más altos en comparación con otros productos que tuvieron que ser solubilizados primero.

Al momento se están conduciendo otros experimentos en diversos sitios en los E.U. para evaluar los fertilizantes líquidos de especialidad de la compañía Tessengerlo Kerley.

Tabla 7. Propiedades típicas de los fertilizantes líquidos manufacturados por Tessengerlo Kerley.

Nombre comercial	Fórmula garantizada	N total como NLL* %	Gravedad específica a 15 °C g/cc	N total por litro a 15 °C G	Otros nutrientes por litro a 15 °C G	Tempet. de precipitac. °C	PH típico
KTS®	0-0-25-17S	0	1.460	0	360K ₂ O, 252S	-9	7.0-8.2
FORMOLENE-PLUS®	30-0-0	60		385	0	-18	9.5
N-SURE®	28-0-0	72		360	0	-18	9.5
N-SURE®-LITE	30-0-0	50		378	0	-18	9.5
THIO-SUL®	12-0-0-26S	0	1.327	160	344S	-7	7.2-8.0
TRISERT®	13-3-4	50	1.179	156	36P ₂ O ₅ , 48K ₂ O	-7	9.5
TRISERT®-CB	26-0-0-0.5B	33	1.223	324	6B	-18	8.7
TRISERT®-KS	15-0-12-8S	60	1.357	204	168K ₂ O, 108S	-18	10.3
TRISERT®-KSB	26-0-5-3S-0.3B	33	1.306	336	65K ₂ O, 40S, 4B	-18	9.5
TRISERT®-NB	26-0-0	33		316	0	-18	8.7
TRISERT®-VG	9-6-8-0.1Fe-0.05Zn-0.05Mn-0.05Cu-0.02B-0.0005Mo	33	1.224	110	72P ₂ O ₅ , 96 K ₂ O	-10	9.9
TRISERT®VGN	9-6-8	33		108	72P ₂ O ₅ , 96K ₂ O	-10	9.7
NFE™	16-0-0-4Fe	0	1.330	214	53Fe	-17	7.5
NMG™	14-0-0-4Mg	0	1.345	188	54Mg	-8	6.0
NZN™	15-0-05Zn	0	1.136	198	66Zn	-8	4

* NLL = Nitrógeno de lenta liberación.

Tabla 8. Respuesta de la papa a la aplicación de KST en el sistema de riego.

Tratamientos	Rendimiento (t/ha)			Promedio
	1995	1996	1997	
Testigo	-	44.6	31.9	
Potasio recomendado	23.7	49.4	34.9	36.0
Potasio recomendado + KTS riego	26.7	52.2	42.4	40.4
LSD 0.05	2.4	5.0	4.9	4.1

Zink, R. T. Colorado State University

Tabla 9. Respuesta del algodón a la aplicación de potasio por el sistema de riego.

Tratamientos* (kg K ₂ O/ha)		Rendimiento
Suelo	Aspersión	kg/ha
0	0	1062
39	0	1056
19.5	19.5	1119
0	39	1112
* KCl en las aplicaciones al suelo y KST en el riego por aspersión. Stevens, University of Missouri		

Tabla 10. Respuesta de la manzana a diferentes fuentes de potasio aplicadas en riego por goteo.

Fuente de K*	Concentración del K en las hojas (%)				
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
KTS	1.68	1.54	1.27	1.06	0.99
K ₂ SO ₄	1.59	1.44	1.24	1.06	0.92
KCl	1.54	1.46	1.26	1.01	0.90
* Aplicaciones mensuales (Mayo-Septiembre) de 13 kg/ha de K ₂ O Stiles, W.C. Cornell University					

Tabla 11. Respuesta del tomate a la aplicación de fuentes de Nitrógeno y Potasio a través de riego por goteo.

Tratamientos*		Rendimiento (ton/ha)		Desecho %
Nitrógeno	Potasio	Total	Tamaño de Mercado	
CaNO ₃	KCl	43.5	33.8	18
CaNO ₃	KNO ₃	44.4	31.6	27
CaNO ₃	KTS	45.7	33.4	23
TRISERT-CB**	KTS	47.5	38.1	12
*N y K ₂ O aplicados durante el ciclo de cultivo en dosis de 78 y 157 kg/ha, respectivamente. ** TRUSERT-CB (26-0-0-0.5B) Sabders, D.C. North Carolina State University				

BIBLIOGRAFIA

- Burt, C., K., O' Commor and T. Ruehr. 1995. Fertigation. Irrigation Training and Research Center. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA.
- Clapp, J.G. 1998. KTS – Potassium Thiosulfate – A Versatile and Expanding Source of Liquid Potassium and Sulfur for Drip Irrigation. Proc. 27th National Agricultural Plastics Congress, p. 68-70.
- Ransdell, H 1968. "Fertigation" The booming market for liquid fertilizers. Fertilizer Solutions 12(2): 16-18, 20.
- Western Fertilizer Handbook. 1995. 8th ed. Interstate Publishers, Inc., Danville, IL.
- Zink, R.T. 1998. Pommer de terra Colorado State University Coop. Extension 4(1) 5 pages.

FERTIGACION DE CULTIVOS BAJO INVERNADERO

Washington Padilla G. *

INTRODUCCION

La fertilización a través del sistema de riego, denominada fertirrigación ya sea vía riego por goteo o por microaspersión, es la forma que más se aproxima al ritmo de absorción de agua y de nutrientes por la planta, ya que diariamente puede entregar a los cultivos dichos elementos.

La fertirrigación permite suministrar a las plantas los nutrientes en los momentos que éstas lo necesitan y en la proporción y cantidades específicas que éstas requieren en las diferentes etapas de su ciclo, esto es, desarrollo de plántulas, crecimiento vegetativo, floración y maduración de frutos.

En otras palabras la fertirrigación es equivalente a eficiencia en la aplicación de los fertilizantes ya que provee al cultivo de la dosis nutritiva necesaria en la época requerida, sin pérdidas de ninguna clase, haciendo que su dinero rinda más.

Para alcanzar el éxito en la fertirrigación, se debe contar con fuentes de alta solubilidad que corresponden a fertilizantes solubles especialmente diseñados para suministrar los nutrientes que los cultivos fertirrigados requieren, en forma diaria.

Estos fertilizantes pueden ser formulados en polvo fino o en soluciones acuosas que permitan una alta disolución en agua. Estas fuentes deben presentar a los iones en forma estequiométricamente balanceados y en formulaciones específicas para cada etapa de desarrollo apuntando hacia la búsqueda de la mayor eficiencia.

La fertirrigación coloca los iones en la solución del suelo en forma fácilmente asimilable por parte del cultivo, estabiliza y mejora la capacidad de intercambio catiónico del complejo coloidal órgano mineral (húmico-arcilla) del suelo, contribuyendo a un balance catiónico adecuado de los iones de la solución del suelo que se encuentran disponibles para la planta.

El suelo es un medio extremadamente dinámico y activo y en él se producen los procesos más complejos de intercambio iónicos, los mismos que están influenciados por muchos factores, sean estos de orden físico, químico o biológico.

Dentro del aspecto físico la estructura y textura del suelo juegan un papel muy importante para producir un mayor o menor movimiento del agua y con él de los nutrientes, dentro de un factor conocido como tortuosidad; la mayor o menor concentración de oxígeno va a depender de la cantidad de agua retenida a una tensión específica por el suelo y la disponibilidad del mismo para los microorganismos, especialmente bacterias y su influencia sobre el desarrollo radicular del cultivo.

En el aspecto químico, la acidez y alcalinidad del suelo es muy importante tomar en consideración, así como también la relación o balance entre los diferentes nutrientes; el tipo de arcilla y la cantidad de materia orgánica presente en el medio y la composición mineral del suelo, son aspectos dignos de ser tomados en cuenta.

Del conocimiento a fondo de todos estos factores, va a depender la aplicación de una concentración óptima de nutrientes y de la composición química de la mezcla fertilizante a ser usada para un cultivo determinado.

En el suelo se presentan procesos de antagonismos y sinergismos entre los iones, este es el caso del potasio que se ve disminuido en su asimilación por parte de las plantas debido a la presencia de sulfatos en altas proporciones; a su vez altas concentraciones de potasio inhiben la asimilación de magnesio; por otra parte una relación alta del calcio más magnesio sobre el potasio, influye en la asimilación de este último, al igual que concentraciones altas de sodio y de amonio. Los fosfatos y nitratos compiten en absorción con los sulfatos y cloruros, de tal forma que es útil eliminar algunos iones indeseables de la solución del suelo y favorecer la presencia de otros.

La fertirrigación ayuda en la corrección rápida y eficiente de cualquier deficiencia nutricional que aparece en algún momento del desarrollo del cultivo; mediante la fertirrigación se controlan los desequilibrios nutricionales causados por aplicación continua y prolongada de algunos nutrientes y omisión de otros, causada por incompatibilidad, insolubilidad, escaso suministro, etc., debido a que en una sola formulación balanceada, se pueden

* Director de la Clínica Agrícola, Quito - Ecuador

introducir en la solución del suelo varios nutrientes, conservando sus características de solubilidad, baja salinidad y máxima seguridad sobre la calidad de la solución que se está aplicando.

Para mirar de una forma objetiva los beneficios de la fertirrigación, a continuación se presenta una aplicación del sistema, para el cultivo de tomate, la misma que puede ser adaptada para cualquier otro cultivo comercial conducido al aire libre o bajo condiciones de invernadero.

El tomate es uno de los cultivos hortícolas más extendidos en los diferentes mercados del mundo. la información para fertirrigación se encuentra entre las más completas.

La fertirrigación del tomate como de cualquier otro cultivo, parte de la información obtenida de un análisis de suelos, el mismo que provee la información necesaria del estado nutricional de mismo y del aporte de los diferentes elementos que ofrece, a la nutrición del cultivo.

Como referencia se indica en la tabla 1 los valores del nivel crítico y del nivel satisfactorio del nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y cinc, usados por AGROBIOLAB-CLINICA AGRICOLA, para este cultivo en el Ecuador.

Tabla 1. Interpretación del análisis de suelos para tomate en Ecuador

Elemento	Nivel Crítico	Nivel Suficiencia
N (mineral)	50- 70 ppm	180-200 ppm
P (Olsen modif.)	1-7 ppm	8-14 ppm
K (Olsen modif.)	70-80 ppm	81-150 ppm
Ca (Olsen modif.)	30-40 ppm	41-140 ppm
Mg (Olsen modif.)	30-40 ppm	41-80 ppm
Zn (EDTA)	1-3 ppm	3.1-7 ppm
Fuente: Padilla W. 1979		

FERTIRRIGACION EN EL CULTIVO DE TOMATE BAJO INVERNADERO

Con la finalidad de conocer el ritmo de absorción de los micronutrientes a lo largo del período vegetativo del tomate, varios estudios han sido realizados a nivel de varios países, llegándose a concluir que el nitrógeno, el fósforo y el potasio mantienen una tendencia ascendente hasta prácticamente la

cosecha, requiriendo más nitrógeno y fósforo en las primeras fases y más potasio en las fases subsiguientes.

Por otra parte, los estudios sobre extracción de nutrientes por el cultivo de tomate, han sido múltiples y han sido recopilados por Dominguez, 1993 y se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Extracción de nutrientes por el tomate, según diversos autores.

Autor	Prod. T/ha	Extracción de nutrientes		
		N kg/t	P ₂ O ₅ Kg/t	K ₂ O Kg/t
Pérez Melián	120	3.66	4.46	5.80
A. Jacobo	40	2.75	0.75	4.00
Besford	80	3.41	0.86	7.53
Serrano	40	2.75	0.63	3.75
Horta	50	5.00	1.60	5.40
Horta	100	3.60	1.20	7.00
Fuente: Dominguez, A. 1993				

Como las extracciones varían, dependiendo de las condiciones del cultivo y de las variedades, se pueden utilizar los siguientes rangos como referencia:

Nitrógeno	2.5 - 3.6 Kg/t de producción
Fósforo	0.5 - 0.8 Kg/t de producción
Potasio	3.5 - 4.0 Kg/t de producción
Magnesio	0.5 - 0.8 Kg/t de producción

De la información anterior, se puede generar una recomendación de fertilización, orientada para el cultivo de tomate en diferentes tipos de explotación, se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Recomendación de fertilización para tomate en diferente tipo de explotación. (En Kg/ha)

Tipo de cultivo	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
a. De temporada*	100 -120	40-100	50-150
b. Precoz **	250-350	200-250	400-600
c. Invernadero**	400-600	150-200	500-900
Fuentes: * Padilla, W. 1979 ** Dominguez, A. 1993			

Un criterio aproximado de los aportes totales de nutrientes que serán necesarios aplicar, en función del nivel de producción y del grado de fertilidad del suelo, se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Cantidades totales de nutrientes (en Kg/t de cosecha)

Elemento	Nivel de Fertilidad		
	Bajo	Medio	Alto
Nitrógeno	5.0	3.5	2.75
Fósforo	1.6	1.2	0.80
Potasio	7.0	5.5	4.00
Fuente: Dominguez, A. 1993			

Es decir, si se desea producir 80 t/ha., de tomate y el grado de fertilidad del suelo, en base de un análisis de suelo, es medio en nitrógeno, bajo en fósforo y alto en potasio, se requerirá una fertilización total de 280 Kg N/ha., 128 P₂O₅/ha., y 320 Kg K₂O/ha.

Estas dosis pueden ser divididas para ser aplicadas en aproximadamente un 40% a la siembra y un 60% durante el desarrollo del cultivo por medio de fertirrigación.

A la siembra se puede aplicar toda la dosis recomendada, pero para la fertirrigación se deben dividir las aplicaciones según las fases de desarrollo del cultivo, y se deben utilizar fuentes fertilizantes que cumplan con los requerimientos del mismo, en esa fase. Como un ejemplo en el cuadro 5, se presenta un programa de fertirrigación, siguiendo las fases de desarrollo del cultivo.

En muchos casos no solo se aplican los tres macroelementos principales, sino que las fuentes fertilizantes traen consigo cantidades apreciables de otros elementos como magnesio, calcio, azufre, boro y cinc.

Con la información presentada, se puede realizar el cálculo de las cantidades de fertilizante que deben ser disueltos en el tanque de fertilización, según los datos técnicos del cultivo.

Cultivo	:	Tomate
Línea de riego	:	Cinta de goteo
Distribución sobre la línea:	:	0.30 m.
Distancia entre líneas	:	0.75 m.
Descarga del gotero	:	1.05 lt./hora
Caudal/ha.	:	46.67 m ³ /hr/ha.
Necesidad nutricional	:	Período desarrollo
N	:	4.4 g/ha/aplicación
K ₂ O	:	4.5 kg/ha/aplicación
Fertilizante	:	Fórmula desarrollo

25-3-20+Microelementos

Conductividad eléctrica del agua	:	0.55 mmhos/cm
Conductividad eléctrica del suelo	:	0.70 mmhos/cm
Tolerancia del cultivo	:	3.5 mmhos/cm

Incremento máximo de C.E. tolerado por el cultivo en la solución de inyección: 2.25 mmhos/cm.

- **Nota:** Los datos de conductividad eléctrica (CE), son obtenidos en base de un análisis del agua y del suelo en un laboratorio.

Cálculo de la cantidad de fertilizante en base del nitrógeno:

$$4.4/0.25 = 17.6 \text{ Kg de fertilizante 25-3-20 /ha/aplicación}$$

Solución madre: En 100 litros de agua

17.6	Kg/100 lt.
17600	g/100 lt.
176	g/lt.

Con una relación de inyección de 1:100 el incremento de la CE, es de 0.67 mmhos/cm. Por lo tanto $1.25 + 0.67 = 1.92$ mmhos/cm., valor que está dentro de la tolerancia del cultivo de tomate.

La superficie cultivada es de 1.8 hectáreas.

El requerimiento del fertilizante 25-3-20 es:

$$17.6 \text{ Kg} \times 1.8 \text{ ha} = 31.68 \text{ Kg}$$

Se debe calcular la cantidad mínima para su disolución, si se conoce que la solubilidad del 25-3-20 es de 300 g/lt.

$$31.68 \times 1000/300 = 105.6 \text{ lt. de agua}$$

Esto significa que se debe utilizar un tanque de 105.6 litros para disolver el fertilizante.

La concentración de la solución será :

$$31.68 \text{ Kg de 25-3-20/105 lt. de agua}$$

Esta solución puede ser aplicada con una relación de inyección de 1:100.

Si el caudal por ha., es de 46.67 m³/hr/ha., el caudal del sector a regarse será:

Tabla 5. Sugerencias de fertilización y fertirrigación con fuentes de alta solubilidad. Cultivo: Tomate Riñón - Producción 150 Ton/ha

Elemento	Fuente	Sitio o bloque Con contenidos	Dosis del elemento puro Varios N P ₂ O ₅ K ₂ O ----- Kg/ha -----			Fuente g/m ² o ppm	Fuente Kg/ha por riego
FERTILIZACION PRESIEMBRA							
Fósforo	18-46-0 + Mat.Orgán.	Bajos en P	35	90	---	20 g/m ²	---
Nitrógeno	Urea	Bajos en NH ₄	60	---	---	13 g/m ²	---
K+Mg+S Sulpomag		Bajos en K	35 Mg	---	---	70	36 g/m ²
Calcio	Carbonato o Sulfato de Calcio	Bajos en Ca	300 Ca	---	---	---	86 g/m ²
FERTIRRIGACION							
Transplante	Soluble 12-42-12+ Micro		Por 20 días				
		Bajos en P	7	25	7	25 ppm P	3
Desarrollo	Soluble 28-1-21+ Micro		Por 25 días				
		Bajos en NO ₃	35	1.25	26	25 ppm N	5
Crecimiento	Soluble 25-3-20+ MICRO		Por 25 días				
		Bajos en NO ₃	63	7.5	50	50 ppm N	10
Producción	Soluble 12-3-40+ Micro		Por 40 días				
		Bajos en K	74	18	243	120 ppm K	15
Continuación del ciclo	Soluble 25-3-20+ Micro		Por 54 días				
		Bajos en N	54	6.5	43	20 ppm N	4
	Soluble 12-3-40+ Micro	Bajos en K	39	9.7	130	48 ppm K	6
Total elemento puro kg/ha			313	158	569		
Los kg/ha/riego de la fuente recomendada, están basados en una lámina de agua de 5 mm lo que es igual a 5 l/m ² /riego o 50 m ³ /ha/riego. Los valores totales de N, P ₂ O ₅ y K ₂ O alcanzados con este programa de fertilización cumplen con los requerimientos ya expresados del cultivo.							

$$46.67 \times 1.80 = 84 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{sector}$$

Como se aplican 105.6 litros de solución madre con una relación de 1:100, se aplicarán:

$$105.6 \times 100 = 10.560 \text{ lt.} = 10.6 \text{ m}^3/\text{sector}$$

El tiempo necesario será: $10.6 / 84 = 0.13 \text{ hr.} = 7.8 \text{ minutos.}$

Cuando la recomendación de fertilización se la expresa en ppm. (partes por millón), se sugiere seguir el siguiente procedimiento:

Se desea aplicar 200 ppm de nitrógeno a partir de una fórmula 25-3-20 + microelementos, con una lámina de agua de 4 mm por cada riego.

$200 \text{ ppm} / 0.25\% \text{ N} = 800 \text{ g./1000 lt de agua}$, si la relación de inyección es de 1:1, si este valor se multiplica por los 40 m^3 de agua a ser aplicados por hectárea, se tiene $800 \text{ g} \times 40 \text{ m}^3 = 32.000 \text{ g}$ que equivalen a 32 Kg/ha riego de la fórmula 25-3-20.

Al aplicar 200 ppm diarios de nitrógeno se están aplicando 32 Kg de 25-3-20 por hectárea, que equivalen a 8 Kg N/ha/día ó 0.8 g N/m²/día, y si éstos se multiplican por los 25 días de la fase de desarrollo del tomate, se tiene que se aplica 20 g N/m² en esa fase.

Al mismo tiempo que se está aplicando la dosis de 8 Kg N/ha/día (200 ppm de N), con la fórmula completa 25-3-20, se están aplicando 0.96 Kg P₂O₅/ha/día (24 ppm) y 6.4 Kg K₂O/ha/día (160 ppm de K₂O).

Si se toma en consideración los valores de la tabla 4 y se los transforma a valores de 150 toneladas de producción por hectárea, se obtienen los valores de absorción de nutrientes para esa producción, según lo expresado en la tabla 13 para una variedad indeterminada de tomate, con un ciclo de 164 días; con estos valores se ha preparado una sugerencia de fertilización básica y de fertirrigación con fuentes de alta solubilidad y se presenta a continuación en la tabla 5.

Tabla 6. Extracción de Macronutrientes en Cultivo de Tomate.

Intervalo	Kg/ha/día				
(días)	N	P	K	Ca	Mg
0 - 21	0.35	0.04	0.45	0.35	0.15
21 - 42	2.70	0.36	3.10	2.46	0.94
42 - 63	4.73	0.57	6.70	3.79	1.62
63 - 84	5.15	0.90	7.47	4.40	1.35
84 - 105	4.39	0.54	5.72	3.12	1.04
105 - 126	2.18	0.54	3.20	1.79	0.61
Rincón et al ,1991 cv. SARKY (indeterminado) Densidad : 30.606 plantas/ha Rendimiento : 135 ton/ha Cultivo : Bajo invernadero					

Tabla 7. Distribución del N, P, K, en los distintos órganos de la planta de tomate. Expresado en porcentaje sobre extracción total

Extracción	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (%)
Tallos y Hojas	35	23	16
Frutos	65	77	84
TOTAL	100	100	100
Rodríguez del Rincón,1995			

Tabla 8. Porcentajes medios de extracciones realizados en diferentes estados fenológicos del tomate.

	N	P	K
Desde Plantación a inicio de la floración	8%	6%	6%
Desde el inicio de la floración a la aparición de los primeros frutos	18%	16%	23%
Desde la aparición de los primeros frutos al inicio de la maduración	30%	25%	19%
Desde el inicio de la maduración al final del cultivo	44%	53%	52%
Rodríguez del Rincón, 1985			

Tabla 9. Relación de N, P, y K según su Extracción en el Cultivo de Tomate

Intervalo (días)	N	Kg/ha/día P	K
0 - 21	1	0.09	1.28
21 - 42	1	0.11	1.15
42 - 63	1	0.09	1.42
63 - 84	1	0.12	1.45
84 - 105	1	0.09	1.30
105 - 126	1	0.17	1.46
Fórmula sugerida de fertilizante : 20-3-25			

Tabla 10. Absorción de nutrientes por el tomate durante el ciclo de 164 días.

Peso Fresco Kg/ha	Peso Seco Kg/ha	% Materia Seca	N Total	N-NO ₃ -----	P ₂ O ₅ -----	K ₂ O Kg/ha	CaO -----	MgO -----
69940	8042	9.5	184	38	72	427	389	104
		Na	Fe	Cu	Zn	Mn		
		-----	-----	Kg/ha	-----	-----		
		8.04	7.08	2.31	0.35	2.73		

Tabla 11. Absorción de nutrientes por la fruta de tomate durante el ciclo de 164 días.

Peso Fresco Kg/ha	Peso Seco Kg/ha	% Materia Seca	N Total	N-NO ₃ -----	P ₂ O ₅ -----	K ₂ O Kg/ha	CaO -----	MgO -----
151.588	6349	4.1	155	3.9	64	345	54	27
		Na	Fe	Cu	Zn	Mn		
		-----	-----	Kg/ha	-----	-----		
		1	1	0.08	0.13	0.15		

Tabla 12. Extracción de nutrientes según la etapa fenológica del cultivo de tomate con un ciclo de cultivo de 164 días expresado en %.

Etapa Fenológica	Duración Período Días	Peso Fresco	Peso Seco	N-TOT	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Inicio Floración	30	1.7	2.7	4	4.6	3.1	2.9	3.9	3.2
Inicio Cuajado	7	2.1	3.7	4.2	5.4	2.9	2.9	5	3.9
Engrose	8	3.5	5.2	7.7	14.1	7	6.3	6.5	6.4
Inicio cosecha	48	22.6	18.2	26.4	28	13.7	20.8	23.3	21.8
30 días de cosecha	30	29.9	28.3	17.6	22.9	28	29.3	24.3	49.4
60 días de cosecha	30	29.7	27.1	20.7	25	30.1	21.8	10	15.3
Fin del Cultivo	11	10.5	14.8	19.4		15.2	16	27	
		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
				Na	Fe	Cu	Zn	Mn	
Inicio Floración	30	1.7	3.6	2	2.4	4.3			
Inicio Cuajado	7	4.7	11.8	6	16.4	2.2			
Engrose	8	3.2	10.7	31	9.6				
Inicio cosecha	48	41.6	40	21	26.2	39.4			
30 días de cosecha	30	18.4	24		1.1				
60 días de cosecha	30	30.4	44.6	36.3	24	19			
Fin del Cultivo	11				24.4				
		100%	100%	100%	100%	100%			

Tabla 13. Absorción de nutrientes por el tomate de una variedad indeterminada producción 150 Ton/ha.

N-Total	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Mg	Na	Fe	Cu	Mn	Zn
----- Kg/ha -----										
317	45	157	570	306	127	12	7	4	3	0.4

Tabla 14. Absorción de Nutrientes Necesarios para Producir una Tonelada de Tomate por Hectárea

N-Total	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Mn	Zn
----- Kg/ha -----										
2.1	0.3	0.36	3.8	1.46	0.51	0.08	0.05	0.03	0.02	0.003

Tabla 15. Contenidos minerales de diversas partes de la planta de tomate variedad cherry en la etapa de floración.

	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B
----- Kg/ha -----											
Raíz	1.32	0.42	1.57	1.33	0.28	0.21	0.160	0.0042	0.0160	0.0089	0.0030
Tallo	1.68	0.44	2.55	1.34	0.54	0.39	0.008	0.0017	0.0023	0.0063	0.0041
Hojas	3.69	0.38	2.04	3.31	0.63	1.33	0.027	0.0018	0.0036	0.0032	0.0066
Flores	1.83	0.43	2.51	0.32	0.18	0.21	0.008	0.0010	0.007	0.0024	0.0029
Total	8.52	1.67	8.67	6.30	1.63	2.14	0.00	0.0100	0.0200	0.0020	0.0200

Tabla 16. Requerimientos nutricionales para tomate cherry hasta la etapa de floración.

N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B
					Kg/ha					
200	39.25	216.75	157.5	40.75	53.5	5.0	0.25	0.50	0.50	0.5

Cultivo: Brócoli (Grande)						
Parte de la Planta	Macronutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Raíz	1.6	0.32	1.96	0.51	0.34	0.23
Tallo	2.66	0.54	5	0.49	0.53	0.52
Hojas	4.37	0.51	3.4	1.33	1.1	0.83
Pella	5.29	0.52	2.8	0.27	0.28	0.51
Total (%)	13.92	1.89	13.16	2.6	2.25	2.09
gr.elemento/planta	32.73	4.44	30.94	6.11	5.29	4.91
Requerimiento total del nutriente						
kg/ha/año	1691.93	229.72	1599.55	316.02	273.48	254.03
Nº plantas/ha	51.700					

Cultivo: Brócoli (Mediano)						
Parte de la Planta	Macronutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Raíz	1.72	0.3	1.99	0.76	0.45	0.39
Tallo	2.46	0.48	4	0.43	0.4	0.61
Hojas	3.19	0.48	3.3	1.34	0.9	0.78
Pella	5.2	0.51	2.69	0.32	0.29	0.59
TOTAL (%)	12.57	1.77	11.98	2.85	2.04	2.37
gr.elemento/planta	17.21	2.42	16.40	3.90	2.79	3.24
Requerimiento total del nutriente						
kg/ha/año	889.67	125.28	847.91	201.72	144.39	167.74
Nº plantas/ha	51.700					

Cultivo: Brócoli (Pequeño)						
Parte de la Planta	Macronutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Raíz	1.64	0.31	1.65	0.59	0.4	0.26
Tallo	2.3	0.37	3.4	0.35	0.34	0.37
Hojas	2.45	0.42	2.29	1.42	0.91	0.6
Pella	4.62	0.55	2.23	0.23	0.22	0.31
TOTAL (%)	11.01	1.65	9.57	2.59	1.87	1.54
gr.elemento/planta	17.08	2.56	14.84	4.02	2.90	2.39
Requerimiento total del nutriente						
kg/ha/año	882.86	132.31	767.39	207.68	149.95	123.49
Nº plantas/ha	51.700					

Cultivo: Brócoli (Grande)					
Parte de la Planta	Micronutrientes (ppm)				
	Zn	Cu	Fe	Mn	B
Raíz	21.3	14.1	2100.5	93.9	19.2
Tallo	29.2	19.1	61.5	15.5	17.3
Hojas	20.6	5	188.1	38.9	34
Pella	40.3	7.5	198.5	24.7	19.2
TOTAL (%)	111.4	46.7	2648.6	173.0	89.7
gr.elemento/planta	0.0262	0.0107	0.5992	0.0407	0.0211
Requerimiento total del					
Nutriente kg/ha/año	1.35	0.56	30.98	2.1	1.09
Nº plantas/ha	51.700				

Cultivo: Brócoli (Mediano)					
Parte de la Planta	Micronutrientes (ppm)				
	Zn	Cu	Fe	Mn	B
Raíz	18.6	14.8	1118.3	101.9	27
Tallo	12.8	15.4	59.1	9.2	21.2
Hojas	12.8	3.2	157.1	24.2	57
Pella	20.5	3.3	98.5	19.8	23
TOTAL (%)	64.7	36.7	1433.0	155.1	128.2
gr.elemento/planta	0.0089	0.0050	0.1962	0.0212	0.0176
Requerimiento total del					
nutriente kg/ha/año	0.46	0.26	10.14	1.10	0.91
Nº plantas/ha	51.700				

Cultivo: Brócoli (Pequeño)					
Parte de la Planta	Micronutrientes (ppm)				
	Zn	Cu	Fe	Mn	B
Raíz	18.7	13.1	742.6	43.9	21
Tallo	17.3	7.6	27.6	9	10.3
Hojas	13.8	1.9	85.2	31.6	29
Pella	28.9	6.2	75.8	17.5	19
TOTAL (%)	78.7	28.8	931.2	102	79.3
gr.elemento/planta	0.0122	0.0045	0.1444	0.0158	0.0123
Requerimiento total del nutriente kg/ha/año	0.63	0.23	7.47	0.82	0.64
Nº plantas/ha	51.700				

Cultivo: Brócoli (Grande)			
Parte de la Planta	Cálculo de humedad (gr)		% de humedad
	Peso húmedo	peso seco	
Raíz	95.8	22.5	76.61
Tallo	537.2	42.8	92.03
Hojas	788.8	109.4	86.13
Pella	530.8	60.4	88.62
TOTAL (%)	1952.6	235.1	87.96
Nº plantas/ha	51.700		

Cultivo: Brócoli (Mediano)			
Parte de la Planta	Cálculo de humedad (gr)		% de humedad
	Peso húmedo	peso seco	
Raíz	54.4	14.1	74.08
Tallo	297.4	26.2	91.19
Hojas	570.8	63.1	88.95
Pella	285.8	33.5	88.28
TOTAL (%)	1208.4	136.9	88.67
Nº plantas/ha	51.700		

Cultivo: Brócoli (Pequeño)			
Parte de la Planta	Cálculo de humedad (gr)		% de humedad
	Peso húmedo	peso seco	
Raíz	51.2	21.9	57.23
Tallo	289.9	34.1	88.24
Hojas	454.8	59.5	86.92
Pella	233.2	39.6	83.02
TOTAL (%)	1029.1	155.1	84.93
Nº plantas/ha	51.700		

Cultivo: Apio (Grande)						
Parte de la planta	Macronutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Raíz	1.7	0.55	3.2	0.53	0.45	0.11
Tallo	1.83	0.52	5.7	0.69	0.39	0.15
Hojas	4.06	0.56	2.59	1.59	0.53	0.51
TOTAL (%)	7.59	1.63	11.49	2.81	1.37	0.77
gr.elemento/planta	8.02	1.72	12.13	2.97	1.45	0.81
Requerimiento total del nutriente kg/ha/año	860.22	184.74	1302.23	318.47	155.27	87.27
Nº plantas/ha	107.326					

Cultivo: Apio (Mediano)						
Parte de la Planta	Macronutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Raíz	1.18	0.55	2.47	0.41	0.43	0.08
Tallo	1.93	0.5	4.6	0.53	0.32	0.16
Hojas	3.45	0.51	2.7	1.41	0.49	0.55
TOTAL (%)	6.58	1.56	9.77	2.35	1.24	0.79
gr.elemento/planta	4.99	1.19	7.43	1.79	0.94	0.60
Requerimiento total del nutriente kg/ha/año	535.79	127.41	797.97	191.94	101.28	64.52
Nº plantas/ha	107.326					

Cultivo: Apio (Pequeño)						
Parte de la Planta	Macronutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Raíz	1.27	0.55	2.59	0.35	0.43	0.1
Tallo	1.36	0.54	3.9	0.49	0.28	0.13
Hojas	3.17	0.52	3	1.55	0.56	0.46
TOTAL (%)	5.8	1.61	9.49	2.39	1.27	0.69
gr.elemento/planta	3.0624	0.85008	5.01072	1.26192	0.67056	0.36432
Requerimiento total del nutriente kg/ha/año	328.6751	91.23569	537.781	135.4368	71.96852	39.10101
Nº plantas/ha	107.326					

Cultivo: Apio (Grande)					
Parte de la Planta	Micronutrientes (ppm)				
	Zn	Cu	Fe	Mn	B
Raíz	42.1	24.6	762.7	34.2	35
Tallo	26	6.4	112.7	13.4	31
Hojas	40.8	6.5	113.6	31.7	31.7
TOTAL (%)	0.01109	0.00375	0.0979	0.00793	0.00977
gr.elemento/planta	0.0117	0.0040	0.1034	0.0084	0.00103
Requerimiento total del nutriente kg/ha/año	1.26	0.43	11.10	0.90	1.11
Nº plantas/ha	107.326				

Cultivo: Apio (Mediano)					
Parte de la Planta	Micronutrientes (ppm)				
	Zn	Cu	Fe	Mn	B
Raíz	29.6	20.9	1617.9	63.4	20
Tallo	28.6	8.9	192.1	16.9	19
Hojas	40.1	9.2	139.9	33.5	12
TOTAL (%)	98.3	39	1949.9	113.8	51
gr.elemento/planta	0.007	0.003	0.148	0.009	0.004
Requerimiento total del nutriente kg/ha/año	0.80	0.32	15.93	0.93	0.42
Nº plantas/ha	107.326				

Cultivo: Apio (Pequeño)					
Parte de la planta	Micronutrientes (ppm)				
	Zn	Cu	Fe	Mn	B
Raíz	35.7	21.4	814.2	46.7	23
Tallo	21.5	7.5	125.4	16.5	25
Hojas	46.7	9.4	229.4	44.5	24
TOTAL (%)	103.9	38.3	1.169	107.7	72
gr.elemento/planta	0.00548592	0.00202224	0.0617232	0.00568656	0.0038016
Requerimiento total del nutriente kg/ha/año	0.588782	0.21703893	6.6245042	0.610316	0.408011
Nº plantas/ha	107.326				

Cultivo: Apio (Grande)			
Parte de la Planta	Cálculo de humedad (gr)		
	Peso Húmedo	Peso Seco	% de Humedad
Raíz	124.1	19.7	84.13
Tallo	632.5	39	93.83
Hojas	245.7	46.9	80.91
TOTAL (%)	1002.3	105.6	89.46
Nº plantas/ha/año	107.326		

Cultivo: Apio (Mediano)			
Parte de la Planta	Cálculo de humedad (gr)		
	Peso Húmedo	Peso Seco	% de Humedad
Raíz	53.8	16.3	69.70
Tallo	427.2	26.7	93.75
Hojas	177.6	33.1	81.36
TOTAL (%)	658.6	76.1	88.45
Nº plantas/ha	107.326		

Cultivo: Apio (Pequeño)			
Parte de la Planta	Cálculo de humedad (gr)		
	Peso Húmedo	Peso seco	% de Humedad
Raíz	32.9	11.5	65.05
Tallo	217.7	19.2	91.18
Hojas	117.1	22.1	81.13
TOTAL (%)	367.7	52.8	85.64
Nº plantas/ha	107.326		

BIBLIOGRAFIA

- Domínguez A., 1993. Fertirrigación. Mundi Prensa, Madrid, p. 217.
- Padilla W., 1979. E.E. Sta. Catalina INIAP. Boletín Técnico N° 32. Quito - Ecuador, p. 36.
- Padilla W., 1996 La Fertigación como alternativa de nutrición vegetal. Edición #9. Guayaquil. 21 p.
- Padilla W., 1997 Primer curso internacional de fertigación en cultivos bajo invernadero. Quito. 125 p.

PROCESOS DE ACUMULACION DE SALES EN FERTIRRIGACION

Alvaro García O.*

INTRODUCCION

La aplicación conjunta del agua y los nutrientes necesarios para el óptimo desarrollo de las plantas se conoce como fertigación. Entre las ventajas de esta técnica se destacan la alta eficiencia en el uso del agua, optimización en el uso de fertilizantes con una mayor facilidad para la dosificación de los nutrimentos de acuerdo con los requerimientos de la planta en las diversas etapas de su ciclo de vida y, finalmente, reducción en los costos de producción al disminuir la mano de obra y las cantidades de agua y agroquímicos necesarios, lo que generalmente está acompañado de una mejor calidad de las cosechas.

A la fertigación se le anotan como principales desventajas la disminución del volumen radical y la formación de sistemas de raíces más superficiales, los problemas causados por la dificultad en el control de la distribución de humedad en el caso de texturas extremas, el alto costo y calidad de los fertilizantes requeridos, los problemas causados a los equipos por precipitación y acumulación de sales poco solubles y la salinización progresiva de los suelos si no se hace un manejo cuidadoso, todo lo cual significa que además del alto costo de la inversión inicial requiere de un manejo más especializado y costoso. Para evitar el efecto de las sales es necesario que el manejo de la fertigación se haga teniendo en cuenta todos aquellos factores de suelo, clima y planta que en últimas determinan la oportunidad y cantidad de nutrimentos a aplicar.

DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUELO DESDE UN SOLO PUNTO

Cuando la rata de descarga del emisor es mucho mayor que la rata de infiltración se presenta dominancia del movimiento lateral del agua y la penetración es superficial. En suelos arenosos el uso de emisores de alta rata de descarga también da como resultado menor penetración del agua y mayor desplazamiento lateral. Esto significa que las características hidráulicas de los suelos determinan la forma y profundidad del volumen de suelo húmedo (Bresler, 1977).

En medios fuertemente alterados, como en los cultivos de flores, no se deben esperar bulbos típicos si no formas atípicas del volumen de suelo húmedo dadas por el contenido y tipo de materia orgánica adicionada, los contenidos de arcilla y arena, el espesor de la capa alterada, la clase y cantidad de arcillas del suelo subyacente no alterado, la frecuencia de riego, la rata de descarga del emisor y la velocidad de infiltración del medio.

El tamaño y forma del volumen de suelo húmedo son determinados por la capacidad de retención de agua del suelo y por la cantidad de agua suministrada. Si es posible reemplazar automáticamente la cantidad de agua que transpira la planta el volumen y la forma del suelo húmedo se pueden mantener constantes se tiene, entonces, una eficiencia de riego del 100% en el caso de que se pueda prevenir la evaporación desde la superficie del suelo. En el volumen húmedo idealmente se deben encontrar toda el agua y los nutrimentos aplicados y si también contiene el 70% del sistema radical se le define como volumen crítico (Ben-Asher et al, 1974). Así, por ejemplo (Sagiv y colaboradores (1975) encontraron que para el tomate sembrado en una duna arenosa la forma del volumen crítico es cilíndrica con un radio y profundidad de 10 cm.

Si se considera que la eficiencia del riego depende de la evapotranspiración (E_t) y del volumen de agua aplicado al volumen crítico (ΔV) como se expresa en la siguiente relación:

$$E_{irrig} = E_t / \Delta V \quad (1)$$

para obtener la máxima eficiencia de riego el volumen de agua aplicada al volumen crítico debe ser igual al volumen de agua transpirado ($\Delta V = E_t$).

En la práctica esto equivale a aplicar agua pura (destilada) en cada ciclo de riego a la cual se añade exactamente la cantidad de nutrimentos que la planta va a extraer hasta el próximo riego.

EFECTO DEL CONTENIDO DE SALES Y DEL SUPLEMENTO DE NUTRIENTES

* Profesor Asociado, Universidad Nacional, Sede Palmira. A. A. 237 Palmira - Colombia

La fertigación implica la aplicación de agua que siempre contiene sales y nutrientes. Es necesario conocer las características de los fertilizantes relacionadas con solubilidad a diferentes temperaturas, el pH de la solución y la conductividad eléctrica de la solución (CE).

CARACTERISTICAS DE LOS FERTILIZANTES USADOS EN FERTIGACION

Los productos usados para fertigación deben tener una solubilidad total en agua para evitar los sedimentos en los filtros, no debe cristalizar ni depositar sales a nivel de los emisores de riego, no corroer los componentes metálicos del sistema de riego, deben permanecer tanto como sea posible dentro del bulbo húmedo al alcance de las raíces y ser compatibles entre sí para disminuir el número de aplicaciones. De ellos se debe conocer las propiedades ya mencionadas: solubilidad a diferentes temperaturas, CE en la solución y pH de la solución.

En la Tabla 1 aparece la evaluación de las propiedades físico-químicas mencionadas de algunas fertilizantes usados en fertigación.

La solubilidad de los fertilizantes es una de las variables más importantes a considerar en la elección

Tabla 1. Evaluación de propiedades de algunos fertilizantes utilizados en riego localizado (*).

Propiedad evaluada	Urea	Solución N-32%	Nitrato amónico	Nitrato potásico	Acido fosfórico	Fosfato monoamónico	Fosfato biamónico
Solubilidad	+	+	+	x	+	x	x
Inducción de precipitados	x	x	+	+	+	-	-
Poder de corrosión	+	x	x	+	-	x	+
Miscibilidad con otros	+	+	+	x	x	+	+
Pérdidas por volatilización	-	-	-	+	+	+	x
Daños a la planta	x	x	x	+	-	x	+
(*) Los signos empleados en la evaluación de propiedades, indican si la actitud del producto es buena (+) intermedia (x) peligrosa (-) Fuente: Del amor, F. (1994).							

Tabla 2. Propiedades físicas de los principales abonos usados en fertigación

Abono	Riqueza %	Solubilidad	Indice	Indice de Sal
-------	-----------	-------------	--------	---------------

de fuentes para fertigación. Es importante anotar que la solubilidad está relacionada con la temperatura; así por ejemplo, el K_2SO_4 tiene una solubilidad de 110 g/L de agua a 20°C y de 160 g/L a 30°C propiedad que es necesario tener en cuenta en la preparación de soluciones para evitar precipitaciones.

La mayor o menor solubilidad está directamente relacionada con la eficiencia en el uso del agua y, en muchos casos con pérdidas de eficiencia en el uso del fertilizante ya que el mismo no se solubiliza a tiempo y puede no estar disponible en los momentos de alta demanda por la planta. Más grave aún es la solubilización en momentos no controlados, la cual puede contribuir a hacer más crítica la concentración de sales.

La Tabla 2 presenta los índices de acidez y salinidad para los principales fertilizantes usados en fertigación.

Giménez (1987) evaluó algunas propiedades físico-químicas de los fertilizantes más usados en fertigación las cuales aparecen en las Tablas 3, 4, 5, 6 y 7.

	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-Varios	g/l 20°C	Acidez (1)	por UF.
Nitrato de cal	15,5-0-0-30(CaO)	1.200	-100	3.4
Nitrato amónico	33,5-0-0	1.600	185	3.0
Sulfato amonio	21-0-0-22 (S)	730	550	3.2
Urea	46-0-0	1.000	158	1.6
Solución N-32	32-0-0	--	--	--
Nitrato Potásico	13-0-46	310	115	5.3
(Cristalizado)				
Sulfato Potásico	0-0-50-18 (S)	110	Neutro	0.9
Cloruro Potásico	0-0-60	340	Neutro	1.9
Fosfato Monopotásico	0-52-33	230		
Fosfato Monoamónico	12-61-0	220	483	0.5
Fosfato Biamónico	18-46-0	400	357	0.6
Sulfato Ferroso	36 (Fe)	260	--	--
Sulfato Manganoso	32 (Mn)	500	--	--
Sulfato de Magnesio	16 (Mg)-13(S)	710	--	--
(7H ₂ O)				
Borax	11 (B)	50	--	--
Sulfato de Cinc	23 (Zn)	750	--	--
(7H ₂ C)				
Cloruro Cálcico	30 (Ca)	600	--	--
(6H ₂ O)				
Acido Nítrico	15,5-0-0	--	--	--
Acido Fosfórico	0-64.5-0	5.500	--	--
Quelatos Hierro				
Fe-EDDHA	6 (Fe)	90	--	--
Fe-DTPA	10(Fe)	220	--	--

(1) El índice de acidez es la cantidad de carbonato cálcico necesaria para neutralizar la acidez producida por 100 unidades de N del abono correspondiente.
Fuente: Castel, 1987.

Tabla 3. Acido fosfórico 75 por 100 (PO₄H₃)

Concent. (%)	pH	Cond.(CE) dS/m	Temp. Inicial °C	Temp. Final °C
50	0,66	149,4	24,0	34,3
40	0,72	119,2	24,0	32,4
30	0,85	102,5	24,0	30,7
20	1,03	74,6	24,0	28,5
15	1,19	58,2	24,0	27,5
10	1,35	41,9	23,7	25,7
5	1,52	23,5	24,0	25,0
2,5	1,68	15,7	23,6	24,4
1	1,88	8,2	23,7	23,9

Tabla 4. Acido Fosfórico 75 por 100 (PO₄H₃)

Concent. (g/L)	pH	Cond. (CE) dS/m	Temp. Inicial °C	Temp. Final °C
5	2,03	5,06	23,9	24,0
2,5	2,15	3,51	23,9	23,0
2	2,44	2,74	23,3	23,4
1	2,62	1,672	23,3	23,3
0,5	2,81	0,959	23,3	23,3
0,25	3,06	0,510	23,3	23,3

Fuente: Giménez, M., 1987.

Tabla 5. Solubilidad de los abonos.

kg de abono soluble en 100 litros de agua

Temperatura	0°	10°	15,5°	21°	26,7°
Fosfato monoamónico	22,7	29,5	33,9	38,4	43,4
Nitrato potásico	13,0	21,0	27,1	33,5	40,3
Sulfato potásico	7,4	9,2	11,5	12,0	12,8

Tabla 6. Nitrato potásico (13-0-46) (Giménez, 1987)

Concent. (%)	pH	Cond.(CE) dS/m	Temp. Inicial °C	Temp. Final °C	No solubl. (%)
40	10,02	143,5	24,5	12,1	73,1
30	10,02	134,8	24,4	11,6	49,1
20	10,03	127,2	24,7	11,9	13,0
15	10,01	108,6	24,6	13,9	3,4
10	10,00	80,6	24,7	17,3	1,4
5	9,95	47,2	24,6	20,8	--
2,5	9,91	27,2	24,7	22,7	--
1	9,63	13,3	24,6	22,9	--

Nitrato Potásica (13-0-46)					
Concent. (g/L)	pH	Cond. (CE) dS/m	Temp. Inicial °C	Temp. Final °C	
5	9,43	8,09	24,6	24,5	
2,5	9,10	5,20	24,6	24,6	
2	7,53	2,44	23,7	23,7	
1	7,02	1,269	23,7	23,7	
0,5	6,56	0,643	23,7	23,7	
0,25	6,56	0,340	23,7	23,7	

Tabla 7. Potasa soluble (SO₄K₂) (Giménez, 1987)

Concent. (%)	pH	Cond.(CE) dS/m	Temp. Inicial °C	Temp. final °C	No solubl. (%)
40	9,14	93,2	24,2	20,5	97,53
30	9,13	89,4	24,3	20,6	84,11
20	9,11	84,6	23,6	20,1	63,21
15	9,08	81,4	23,6	20,2	23,76
10	9,01	73,6	23,9	20,7	4,77
5	8,85	41,9	24,1	22,5	Indicios
2,5	8,60	22,7	24,3	23,3	--
1	8,20	10,6	24,4	24,0	--

Potasa soluble (SO ₄ K ₂)					
Concent. (g/L)	pH	Cond. (CE) dS/m	Temp. Inicial °C	Temp. Final °C	
5	7,88	6,08	24,3	24,0	
2,5	7,70	3,60	24,4	24,2	
2	7,47	2,58	24,0	24,0	
1	7,14	1,415	24,0	24,0	
0,5	6,63	0,765	24,0	24,0	
0,25	6,55	0,320	24,0	24,0	

En estos cuadros se puede observar claramente el efecto salino de todas las soluciones empleadas. En consecuencia, es necesario manejar el fertirriego cuidadosamente para que en ningún caso exceda los niveles críticos de tolerancia del cultivo.

En la Tabla 8 se presentan los niveles de tolerancia a las sales de algunas especies frecuentemente manejadas bajo fertigación y en la Tabla 9 la tolerancia de algunas especies a los cloruros en el extracto de saturación y en el agua de riego.

En el perfil del suelo húmedo las sales solubles se concentran en la periferia del bulbo cerca del frente húmedo. Si la planta extrae más agua que sales de este volumen de suelo restringido, se produce un incremento gradual de la concentración de sales en la zona crítica que inevitablemente crece con cada ciclo de riego. El uso de aguas salinas rápidamente conduce a alcanzar niveles de salinidad en el volumen crítico peligrosos para las plantas. Para evitar esto, se trata de mantener el volumen crítico a una tensión de humedad casi constante con un contenido óptimo de nutrimentos y sales añadiendo un exceso de agua para lavar (excede la cantidad transpirada y la capacidad de retención de humedad del suelo).

En algunas zonas se usa la fertigación continua bajo condiciones que implican peligro de salinización. La planta no sufre de estreses por agua sales o nutrientes, pero este sistema puede causar problemas de aireación aún en suelos arenosos, a más de que implica la pérdida de nutrimentos y agua. El exceso de estos puede llegar por percolación a contaminar las aguas subsuperficiales.

Una vez que se inicia la fertigación el agua en el volumen crítico se disminuye debido a infiltración y evapotranspiración. Cuando la evapotranspiración es baja, un riego al día es suficiente para mantener una humedad adecuada en la zona húmeda y a medida que aumenta la ET aumenta la necesidad de riego.

En los climas áridos donde la evaporación de la superficie del suelo es un componente importante del balance de aguas, las sales móviles en el suelo tienden a acumularse en la periferia de la zona húmeda, la cual es especialmente tóxica para el caso de plántulas porque todo el sistema radical se encuentra en una zona muy altamente salina aún cuando se riega con aguas de muy buena calidad. Experimentos de Kafkafi y Bar Yosef (1980) muestran que usando altos o bajos suministros de agua (6 y 3 mm/día respectivamente) los iones K y NO₃ (móviles) se concentran en los 5 cm

superficiales y en un radio de 10 a 30 cm del emisor.

Tabla 8. Tolerancia a las sales de algunos cultivos

Cultivo	Nivel crítico		Clasif.
	(A) dS/m	(B)*	
Alfalfa	2.0	7.3	MS
Algodón	7.7	5.2	T
Arroz	3.0	12.0	MS
Brócoli	2.8	9.2	MS
Batata	1.5	11.0	MS
Cebada (grano)	8.0	5.0	T
Caupí	1.3	14.0	MS
Cebolla	1.2	16.0	S
Ciruela	1.5	18.0	S
Caña de azúcar	1.7	5.9	MS
Durazno	1.7	21.0	S
Espinaca	2.0	7.6	MS
Fresa	1.0	33.0	S
Fríjol	1.0	19.0	S
Lechuga	1.3	13.0	MS
Maní	3.2	29.0	MS
Maíz	1.7	12.0	MS
Naranja	1.7	16.0	S
Pimienta	1.5	14.0	MS
Papa	1.7	12.0	MS
Pasto Bermuda	6.9	6.4	T
Pasto amor	2.0	8.4	MS
Pasto Sudán	2.8	4.3	MT
Rábano	1.2	13.0	MS
Repollo	1.8	9.7	MS
Remolacha	4.0	9.0	MT
Soya	5.0	20.0	MT
Trébol spp.	1.5	12.0	MS
Toronja	1.8	16.0	S
Tomate	2.5	9.9	MS
Trigo	6.0	7.1	MT
Uva	1.5	9.6	MS
Zanahoria	1.0	14.0	S
Rosa	3.0		MS
Gypsophila	2.0	--	S
Crisantemo	5.5	--	T
Clavel	3.0	--	MS
Azalea	1.0	--	S

*** (B) Porcentaje de disminución en el rendimiento por unidad de aumento en salinidad más allá del nivel crítico.**

S = Susceptible
MT= Medianamente tolerante **T = Tolerante**
(Maas y Hoffman, 1983)

Tabla 9. Tolerancia de algunos cultivos a los cloruros en el extracto de saturación y en el agua de riego

Especie	Concentración	Agua de Riego
---------	---------------	---------------

	permisible de cloruros Extracto de saturación	
AGUACATE		
Indias Occidentales	7.5	5.0
Guatemalteco	6.0	4.0
Mexicano	5.0	3.3
CITRICOS		
Toronja, Mandarina Cleopatra	25.0	16.6
Tangelo, Naranja Agria, Limón rugoso	15.0	10.0
Citrumelo, Calamondín, N, Trifoliada	10.0	6.7
CULTIVOS MISCELANEOS		
Remolacha aprox.	90.0	--
Maíz	70.0	--
Tomate	39.0	--
Pasto Rhoades	24.0	--
Fríjol	18.0-24.0	--
Geranio	25.0-30.0	30.0
Aster	40.0	--
Gardenia	25.0	--
Gladiolo	40.0	
Rosas	---	5.0
Clavel	---	5.0
Crisantemo	---	5.0
Adaptado de Maas y Hoffman (1984), Western Fertilizer Handbook (S.F.)		

Una planta creciendo en un volumen de suelo húmedo de las características anteriores enfrenta problemas como fluctuaciones en el suplemento de agua y nutrimentos, en las temperaturas día-noche y niveles cambiantes de nutrición y salinidad.

Las diferencias en el suplemento de agua para plantas con sistemas radicales restringidos causan reducciones en el potencial de agua de la hoja y, en consecuencia, en el rendimiento por lo que entre más pequeño sea el volumen radical más frecuente deberá ser el suministro de agua y nutrientes. Plantas con sistemas radicales restringidos tienen en consecuencia reducción en la parte aérea (Carmi et al, 1992).

Esto permite concluir que desde el principio del cultivo se debe procurar el mejor desarrollo radical posible mediante el mantenimiento de un volumen crítico tan grande como sea posible (fertigación fuerte), lo que se puede lograr con el uso de microaspersores en los casos en que ello sea posible desde el punto de vista sanitario. También se puede recurrir al uso de giberelinas y citoquininas ya que existe un complejo desarrollo

hormonal en las respuestas de las raíces confinadas en volúmenes muy restringidos.

Igualmente, se sabe que los sistemas muy restringidos y muy superficiales pueden causar problemas en especies muy susceptibles a las temperaturas altas o bajas. Se puede concluir que el tamaño del sistema radical determina el éxito de cualquier cultivo bajo fertigación con bajo nivel de control.

SUMINISTRO DE NUTRIENTES VS ESTADO FENOLOGICO

Se sabe que tanto el largo del ciclo de vida como la aparición de los diferentes estados fenológicos de una especie o variedad dependen de su adaptación a las condiciones agroecológicas y de manejo y que la absorción de nutrimentos tiene patrones diferentes durante los diferentes estados fenológicos. Así, experimentos de Kafkafi et al (1984) muestran que en tomate la aplicación frecuente de la misma solución nutritiva sin tener en cuenta la absorción diaria de sales y nutrimentos

por la planta puede causar una acumulación de sales en el volumen crítico.

La absorción de los diferentes nutrimentos cambia de acuerdo con el estado fisiológico de la planta, aún cuando se mantiene constante la concentración del nutrimento en la solución durante todo el ciclo de vida de la planta.

Las plantas seleccionan sus nutrimentos de acuerdo a la demanda. Así, por ejemplo, el algodón absorbe preferencialmente potasio a partir de la formación de las bellotas (Halevi, 1976). La absorción de cationes trae como consecuencia la extrusión de protones (H^+) lo que causa disminución del pH. Esto explica la acidificación progresiva de los suelos del Tolima sembrados con maní o las observaciones de Kafkafi (1994) en fresa.

El conocimiento de estos mecanismos puede explicar la salinización estacional o los cambios de pH que se presentan en algunos cultivos como las flores y plantea la necesidad de realizar investigaciones sobre la eficiencia de la fertigación para evitar degradación de suelos y aguas, se deben determinar las demandas estacionales por los diferentes nutrimentos durante el ciclo de vida para programar la fertigación lo más ajustadamente posible en lo referente a composición de la solución nutritiva, cantidad y oportunidad en el suministro para cada condición ambiental y estado fisiológico.

En la Tabla 10 se presenta la duración aproximada de estados fenológicos importantes en algunos cultivos comerciales.

TIPO DE FERTILIZANTE A APLICAR NITROGENO

La forma de Nitrógeno absorbido por la planta tiene un efecto pronunciado en la nutrición de la planta y en el crecimiento. En soluciones nutritivas no buferadas las plantas acidifican el medio cuando la fuente de nitrógeno es NH_4^+ y lo alcalinizan cuando es NO_3^- ; y esto tiene consecuencias en la producción de materia seca y en la absorción de nutrimentos. Este tipo de información, a la que no se presta atención cuando se manejan cultivos de tipo semestral o anual en los cuales la fertilización se realiza uno o dos veces durante el ciclo de cosecha, adquiere importancia en cultivos fertigados como en las flores.

La forma de nitrógeno absorbido por las plantas tiene un efecto marcado en la producción de

carbohidratos lo que a su turno afecta el balance de cationes y aniones en la planta (de Wit et al, 1963). Cuando la fuente de N es NO_3^- la concentración de los cationes divalentes es mayor que si la fuente de N es NH_4^+ . Cuando ambas fuentes están presentes en la solución, la planta toma preferencialmente el NH_4^+ si la relación NO_3^-/NH_4^+ es mayor de 0.1 (Kafkafi et al, 1971). Cuando el NH_4^+ es solo el 40% del N total en la solución plantas como el tomate absorben alrededor del 80% de su N en esta forma. En muchas especies la toma de NH_4^+ causa disminución en las concentraciones de Ca^{+2} y Mg^{+2} , no afecta la absorción de K^+ y causa aumento del P (Moritsugu et al, 1983). El efecto de la urea sobre la composición mineral es similar al del nitrato en una toma de tipo ácido (Kirkby and Mengel, 1967). Las bajas temperaturas, los suelos ácidos y un suministro diario de NH_4^+ pueden resultar en una acumulación de este ión en el suelo el cual puede causar una disminución en la concentración foliar de Ca^{+2} y Mg^{+2} en la planta pero con efectos salinos menos marcados que cuando el suministro de N se hace en forma de NO_3^- .

También se sabe que el NH_4^+ es metabolizado total y rápidamente en las raíces y que es una buena fuente de N siempre y cuando la raíz tenga unas buenas reservas y suplemento de azúcares. Cuando existen condiciones de alto consumo de azúcar en la raíz (temperaturas altas) y si el suministro de azúcar a la raíz es bajo (etapa de fructificación) el NO_3^- es una mejor fuente de N (Kafkafi, 1994). Debe recordarse que el NO_3^- tiene un efecto salino más fuerte que el NH_4^+ ; así, para la zona de Subachoque (Cundinamarca) se ha encontrado una relación directamente proporcional entre la concentración de NO_3^- en el suelo y la salinidad en el suelo con un valor de $r = 0.927^{**}$ la cual se expresa mediante la ecuación:

$$CE \text{ (dS/m)} = 0.55 + 0.01NO_3^- \quad (2)$$

Las diferentes especies de plantas reaccionan muy diferentemente a las diferentes fuentes de nitrógeno. Algunas son sensibles a la presencia de altas concentraciones de amonio en el agua de irrigación como aquellas que tienen sistemas radicales muy pequeños respecto a la parte aérea o la gran mayoría de especies durante la fructificación cuando las raíces sufren por un suministro pobre de azúcares.

Tabla 10. Duración aproximada de estados fenológicos importantes en algunos cultivos comerciales.

Cultivo	Ciclo total en días	Fase crítica (días)	Producción Com.
Tomate	90-110	Llenado de fruta 35-40	35000 kg
Cebolla	150	Producción de bulbos 50	33000 kg
Ajo	180	Producción de bulbos 55	10000 kg
Chile	90-100	Crecimiento de frutos 40	20000 kg
Melón Cantaloup	90-100	Llenado de frutos 40	20000 kg
Vid Vinífera	200	Amarre – Cosecha 90	40000 kg
Vid de mesa	170	Amarre – Cosecha 70	30000 kg
Fuente: SQM MEXICO, 1994			

Tabla 11. Cantidad de agua aprovechable para las plantas en suelos de diferente textura (mm/m).

Textura	Agua aprovechable en el perfil del suelo Rango	Promedio
Arena gruesa	33-42	36
Arenoso franco	62-83	67
Franco arenoso fino	83-125	104
Arena muy fina, francolimoso	125-192	158
Franco arcilloso arenoso		
Franco arcilloso mod. fino	146-208	175
Arcilloso limoso		
Arcilloso, arcillo-limoso, arcillo-arenoso fino	133-208	167
(Shockley, 1956)		

Esto hace que la composición del fertilizante y su concentración en el agua de irrigación deban ser escogidos muy cuidadosamente para cada cultivo, condición climática para asegurar un óptimo crecimiento. Algunas prácticas pueden ayudar como la aplicación de grandes cantidades de agua con muy bajos niveles de nutrimentos o no permitir que elementos tóxicos para algunas especies como el NH_4^+ excedan del 10% del N total necesario.

MANEJO DEL AGUA PARA FERTIGACION

El Suelo como reservorio de agua

El agua es retenida en el suelo en forma de películas alrededor de las partículas de suelo y en forma temporal en los poros. El suelo está saturado cuando el aire de todos los poros ha sido desplazado por el agua que los ocupa. Luego el agua se mueve fuera de los poros por gravedad y cuando el drenaje cesa, generalmente después de más o menos un día, el suelo queda a capacidad de campo (CC) o lo que es lo mismo en el Límite

Superior de Drenaje (LSD). Cualquier cantidad de agua que se añada en estas condiciones puede causar sobresaturación o condiciones de encharcamiento.

A medida que las raíces de las plantas la absorben, el contenido de agua del suelo disminuye, proceso en el cual ayuda determinantemente la evaporación. Si el proceso continúa sin que se adicione agua, llega un momento en el cual la planta no puede extraer más agua y comienza a marchitarse y cuando ya no se puede recobrar del marchitamiento durante la noche se tiene el Punto de Marchitamiento Permanente (PMP) o límite inferior del drenaje (LID). El agua aprovechable para la planta (AAP) es la diferencia entre ambos límites. La cantidad de agua aprovechable que el perfil del suelo puede almacenar depende de su textura y, generalmente, fluctúa entre 33 y 208 mm por metro (Tabla 11).

La aplicación de una cantidad igual de agua a suelos de diferente textura cuando se encuentra a CC humedece el suelo a una mayor profundidad en el caso de los arenosos que en los arcillosos.

Aunque los arenosos retienen aproximadamente un tercio del agua aprovechable que retiene un suelo franco o uno arcilloso, el agua no es retenida muy fuertemente, y por consiguiente, está más disponible para las raíces. La mayor parte del agua aprovechable en una arena puede ser extraída por la raíces a una tensión de 100 kPa (1 bar) o menos.

En contraste, en un suelo arcilloso se requiere una tensión 4 veces mayor para extraer la misma cantidad de agua (McCarthy et al, 1992).

La absorción de agua y los procesos evaporativos producen una concentración de las sales en el suelo que hacen que el potencial osmótico sea mayor (más negativo) y que el agua disponible para la planta disminuya, lo que se refleja en el crecimiento y producción. Por ello, se requiere un excelente manejo del agua de acuerdo con su calidad. Ayers y Westcott (1985) en el Manual 29 de la FAO resumen la mayoría de los principios que, sobre calidad de agua para riego, se manejan actualmente. (Tabla 12).

Tabla 12. Criterios para evaluar la calidad del agua de riego.

Problema potencial	Unidades	Ninguno	Grado de restricción en el uso Ligero a moderado	Severo
SALINIDAD				
CEa	dS/m	< 0.7	3.7-3.0	> 3.0
ó TDS	mg/L	<450	450 - 2000	> 2.000
INFILTRACION				
RAS = 0-3 y CEa =		>0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
= 3-6 =		>1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
= 6-12 =		>1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
= 12-20 =		>2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
= 20-40 =		>5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
TOXICIDAD DE IONES ESPECIFICOS				
Sodio (Na)				
Riego superficial	RAS	<3	3 - 9	> 9
Riego por aspersión	me/L	<3	>3	
Cloruros (Cl ⁻)				
Riego superficial	me/L	<4	4 - 10	> 10
Riego por aspersión	me/L	>3	>3	
Boro (B)				
	mg/L	<0.7	0.7 - 3.0	>3.0
Elementos traza				
Nitratos (N-NO ₃)				
Bicarbonatos (HCO ₃)	mg/L	<5	5 - 30	> 30
pH	me/L	<1.5	1.5 - 8.5	>8.5
	Rango normal	6.5	8.4	

Tabla 13. Influencia de la calidad del agua como peligro potencial de oclusión a sistemas por goteo.

Problema potencial	Unidades	Ninguno	Grado de restricción en el uso Ligero a moderado	Severo
--------------------	----------	---------	---	--------

FISICO				
Sólidos en suspensión	mg/L	< 50	50-100	> 100
QUIMICO				
pH	mg/L	< 7.0	7.0 - 8.0	> 8.0
Sólidos disueltos	mg/L	< 500	500 - 2.000	> 2000
Manganeso	mg/L	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
Hierro	mg/L	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
Sulfuro de hierro	mg/L	< 0.5	0.5 - 20.0	> 2.0
BIOLOGICO				
Poblaciones bacteriales	Número máximo/mL	<10.000	10.000-50.000	> 50.000

Actualmente se consideran los efectos que las sales pueden tener sobre la planta (efecto osmótico), sobre el suelo especialmente sobre la capacidad de conducir el agua que puede ser alterada por iones que producen efectos deletéreos sobre el suelo como el Na y el Mg; también se hace hincapié en el peligro de toxicidad específica de algunos iones como Na, Cl, B, etc.

Cuando se planea un sistema de fertigación se debe considerar que el riesgo que para el mismo puede significar algunos agentes potenciales de daño de tipo físico, químico y biológico. Los agentes de tipo físico más importantes son los sólidos en suspensión entre los cuales se tienen arenas, limos, arcillas y materia orgánica. Los de tipo químico están relacionados con las precipitaciones de carbonatos de Calcio y magnesio, de sulfatos de calcio, de fertilizantes como fosfato, hierro, cinc, cobre y manganeso y con la presencia de metales pesados en forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos y sulfuros. Los agentes biológicos comprenden algas y bacterias de varios tipos (García, 1990). En la Tabla 13 se presentan los parámetros recomendados por Ayers y Westert (1985) para evaluar la calidad del agua para riego teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados.

REQUERIMIENTO DE LAVADO

A medida que las raíces y la evaporación hacen que se agote el agua en el suelo las sales adicionadas en el riego permanecen en el suelo en donde se acumulan y reducen la disponibilidad de agua para las plantas o causan problemas de toxicidad, de desbalances nutricionales y, algunas,

pueden causar deterioro de las condiciones físicas del suelo. Para disminuir estos efectos se acostumbra aplicar un exceso de agua para lavar el exceso de sales de la zona de raíces.

El lavado consiste en la aplicación de agua de riego en exceso para remover las sales de la zona de las raíces. El exceso de agua percola debajo de la misma llevando las sales disueltas. El exceso de agua expresado como porcentaje del agua de riego es la fracción de lavado (FL). El control efectivo de la salinidad significa asegurar que la fracción de lavado es lo suficientemente grande como para prevenir la acumulación de sales en la zona de raíces. La FL se define:

$$FL = \frac{100 \text{ Vad}}{\text{Vai}} \quad (3)$$

Donde:

FL: Fracción de lavado (%)

Vad: Cantidad de agua que drena debajo de la zona de raíces.

Vai: Cantidad de agua de riego menos escorrentia superficial.

A causa de lo impráctico que resulta determinar el volumen de agua de drenaje se han desarrollado algunas técnicas para relacionar la FL con la salinidad promedio de la zona de raíces en el agua de riego. Estas técnicas asumen que el agua de riego es la mayor fuente de sales en el suelo.

La fracción del agua de riego aplicada que debe drenar por debajo de la zona de raíces para mantener la salinidad de esta dentro de los límites de tolerancia para una determinada especie se

conoce como requerimientos de lavado (RL). Este se puede expresar como la relación existente entre el volumen del agua de drenaje y el volumen del agua de irrigación:

$$RL = \frac{V_d}{V_i} \quad (4)$$

Este concepto es válido solo en condiciones en las cuales las sales no precipitan o disuelven, cuando la absorción de sales por el cultivo es despreciable. El requerimiento de lavado también puede expresarse en términos de la concentración de sales de las agua.

$$RL = \frac{V_{ad}^*}{V_{ai}^*} = \frac{CE_{ai}}{CE_d^*} \quad (5)$$

El asterisco (*) indica cantidades requeridas. El volumen de agua de riego necesario V_i^* para cubrir los requerimientos de un cultivo específico (V_{uc}) y para un drenaje dado se calcula:

$$V_{uc} = V_{ai} - V_{ad}$$

$$RL = \frac{V_{ad}}{V_{ai}}$$

$$V_{ad} = RL \cdot V_{ai}$$

$$V_{uc} = V_{ai} - RL \cdot V_{ai} = V_{ai} (1 - RL)$$

$$V_{ai} = \frac{V_{uc}}{1 - RL} = \frac{ET}{1 - FL/100} \quad (6)$$

La cantidad de agua de lavado calculado mediante esta última ecuación se debe ajustar de acuerdo con la eficiencia de riego.

Históricamente los RL se han calculado usando la ecuación (6) usando los datos de tolerancia derivados de experimentos manejados con altas fracciones de lavado.

La conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo asociado con una disminución del 50% en el rendimiento (CE_{50}) fue seleccionado

para substituir el término CE_d y el requerimiento de lavado:

$$RL = \frac{CE_{ai}}{CE_{50}} \quad (7)$$

Como estos cálculos pueden resultar muy conservadores hoy en día se pueden usar a voluntad los datos expresados para una reducción en el revolimiento del 10, 20 o más por ciento.

En la práctica los RL se deben determinar el suelo y la planta bajo cada condición. Los RL demasiado elevados pueden causar la elevación del agua freática altamente salina y causar problemas de aireación y toxicidad a las raíces.

LAVADO DE SUELOS SALINOS

Lavado de suelos con niveles freáticos superficiales

En áreas con niveles freáticos superficiales y salinos, el agua freática puede contribuir substancialmente al uso de agua por las plantas. Puesto que la salinidad de esta agua es normalmente mucho mayor que la del agua de riego, su uso o su influencia, puede causar un incremento significativo en la salinidad del suelo. Por consiguiente el uso de los procedimientos tradicionales para estimar la FL y el RL pueden subestimarlos.

Desafortunadamente no existe un método para corregir los métodos tradicionales por el efecto salino del agua freática sobre el suelo. Lo más aproximada es la determinación (estimación) de la cantidad de agua necesaria para lavado durante procesos de preirrigación conocido como el método de recuperación en preiego.

Si las sales no se lavan durante la preirrigación y se hace muy poco lavado durante el ciclo del cultivo la salinidad del suelo continuará aumentando en el tiempo.

Estimativos de la cantidad de agua de lavado necesaria demostraría que depende de la contribución del agua freática a las necesidades del cultivo. Cuando la contribución es menor del 30% a 40% se requieren aproximadamente 2.5 cm de agua de lavado para cada 30 cm de suelo a lavar (Hanson, 1993).

El fenómeno básico involucrado en la recuperación es la dilución y movimiento de las sales para llevarlas fuera del perfil radicular. El lavado es el proceso fundamental y el drenaje es indispensable ya sea éste natural, debido a la existencia de buena permeabilidad en suelo y subsuelo, o artificial.

El procedimiento de recuperación es específico para cada caso y depende de factores tales como tipo de suelo (textura y estructura), naturaleza de la salinidad, geología, topografía, suplemento de agua, rotación de cultivos y limitaciones debidas al tiempo.

La cantidad de agua que debe pasar a través del perfil para lavar las sales depende de tres factores: 1) la salinidad inicial; 2) la técnica de aplicación del agua; y 3) la textura del suelo. La técnica de lavado más corriente es la inundación en piscinas que puede ser permanente o intermitente. El riego por aspersión usando grandes volúmenes de agua también puede usarse.

La siguiente ecuación describe la reducción en la salinidad del suelo (C/Co) como una función de la cantidad de agua que pasa por cada unidad de suelo durante el lavado (dl/ds : lámina de agua) (Hoffman, 1981).

$$\frac{C}{Co} \times \frac{dl}{ds} = K \quad (8)$$

- C: Máxima salinidad permisible
 Co: C_{Ee} inicial
 ds: Profundidad efectiva a recuperar (cm)
 dl: Lámina de riego (cm)
 K: Valor que refleja el contenido volumétrico saturado de agua del suelo y la eficiencia de lavado según el tipo de suelo. Para suelos orgánicos $K = 0.45$; suelos franco arcillosos $K = 0.3$; y arenoso franco $K = 0.1$

RESUMEN

El uso de la fertigación hace posible la producción agrícola con muchas ventajas, especialmente en suelos pobres, suelos arenosos, calcáreos, pedregosos y también en cultivos bajo condiciones controladas como los de flores y hortalizas. Se resumen las ventajas y desventajas del uso de esta técnica. Se discute la problemática de la salinización y el manejo de la misma en cultivos

bajo fertigación. La planeación del sistema de riego y el suplemento de nutrimentos de acuerdo con el estado fisiológico de desarrollo, y de acuerdo con las características climáticas y de suelo, puede resultar en altas producciones de cultivos de calidad superior con un mínimo de contaminación, pero la acumulación de sales en la superficie del suelo puede prevenir con los riegos localizados de alta frecuencia (fertigación) coberturas plásticas, mulches y lavados.

BIBLIOGRAFIA

- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture FAO. Irrigation and Drainage paper No. 29. Rome p. 125.
- Ben Asher, J., Bar-Yosef, B., and Kafkafi, U. 1974. Application of an irrigation model and fertilization considerations in growing tomato and sand dunes. Plant Analysis and fertilizer problems, 7th International Colloquium, Hanover, Germany, pp 35-43.
- Bresler, E. 1977. Trickle-drip irrigation: principles and applications to soil-water management. Adv. Agron. 29: 343-393.
- Carmi, A.; Plaut, Z.; Hever B. and Grava, A. 1992. Establishment of shallow and restricted root system in cotton and its impact on plant response to irrigation. Irrig. Sci. 13:87-91.
- dE Wit C.T.; Dijkshoorn, W. and Noggle, J.C. 1963. Ionic balance and growth of plants. Versl. Landbouwle. Onderz. 69:15.
- Del Amor, F. 1994. Fertigación. Subgerencia de estudios agrícolas SQM - NITRATOS S.A. (Versión preliminar) Santiago de Chile. 105 p.
- FAO. 1985. Water quality for agriculture irrigation and drainage paper. Vol. 29. 387 p.
- García O., A. 1991. Parámetros para la evaluación de la calidad de aguas para riego. En: Fundamentos para la interpretación de Análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p. 257-272.
- García O., A. 1994. Diagnóstico y control de la fertilidad en suelos afectados por sales y sodio. En: Fertilidad de suelos. Diagnóstico y control. Nueva edición. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p. 469-500.
- Giménez, M. 1987. Abonos líquidos ácidos para fertirrigación por goteo. Boletín Técnico. Fertilización. FESA Fertilizantes. pp. 57-67.
- Giménez, M. 1987. Abonos fosfatados y potásicos para fertirrigación por goteo. Boletín Técnico ERT Fertilizantes. España.
- Hanson, B. 1993. Reclaiming saline soils. In: Agricultural salinity and drainage. p. 77-80.

- Kafkafi, V.; and Walerstein, I., and FEIGEN-BAUM, S. 1971. Effect of K and ammonium nitrate on the growth, cation uptake and water requirement of tomato grown and sand culture. 1sr.
- Kafkafi, V.; Dayan, E. and Akiri, B. 1984. Nitrate and phosphate uptake by tomato from nutrient solution in a commercial operation. Proc. 6th Int. Congr. on Soilless Culture, Lunteren, The Netherlands, pp. 291-298.
- Kafkafi, V. 1994. Combined irrigation and fertilization in arid zones. Israel Journal of plant Sciences. Vol. 42. pp. 301-320.
- Kirkby, E.A. and Mengel, K. 1967. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea, or ammonium nutrition. Plant physiol. 42: 6-14.
- Mass, E.V., Hoffman, G.J., Chaba, G.D., Poss, V.A. and SHANNON, M.C. 1983. Salt sensitivity of corn at various growth stages. Irrig. Sci. 4, 45-57.
- McCarthy, M.G., Jones, L.D., Due, G. 1992. Irrigation principles and practices. In: Viticulture B.G. combe and P.R. Dry (Eds.) Vol. 2. Practices. Winetitles. Adelaide. Austr.
- Moritsugu, M.; Suzuki, T.; and Kawasaki, T. 1983. Effects of nitrogen source on growth and mineral uptake in plants under constant pH and conventional culture conditions. Ber. Ohara Inst. Landwirtsch. Biol. Okayama Univ. 18: 125-144.
- Sagiv, B., Ben-Asher, J.; Bar-Yosef, B., Kafkafi, V., and Goldberg, D. 1975. Combined irrigation and fertilization of tomatoes grown on sand dunes. In: Ecological research on development of arid zones (Mediterranean deserts) with Special Publication No. 39. Volcani Center, Bet Dagon, Israel, pp. 141-146.
- Shockley, D.G. 1956. The influence of moisture holding characteristics upon sprinkler irrigation desing. Sprinkler irrigation manual, wright Rain, p. 45-50.

MANEJO DE SUELOS CON ACUMULACION DE SALES

Alvaro García O.*

GENERALIDADES

La salinidad de los suelos en alguna de sus manifestaciones ha sido la causante, en mayor o menor grado, de la reducción en la capacidad productiva de los suelos de muchas regiones del mundo y del ocaso de muchas civilizaciones. Estudios de la Naciones Unidas indican que debido a la salinización hoy hay 1.5 veces más tierra improductiva que la que se encuentra bajo riego. Desde tiempos muy antiguos se conocen los efectos de las sales sobre los suelos y los cultivos hasta el punto de que en la Biblia se los menciona (Deuteronomio 29 :22-23); también se sabe que algunas civilizaciones guerreras del Asia Menor hacían uso de ellas para impedir el crecimiento y desarrollo de sus enemigos al hacer improductivos los suelos a los cuales se las aplicaba.

La salinidad es común en las regiones áridas y semi-áridas en donde la evapotranspiración excede a la precipitación y es necesario recurrir a la irrigación para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. Cuando las sales solubles se concentran en el perfil del suelo y exceden ciertos límites, se producen condiciones que afectan el crecimiento normal de las plantas; sus efectos son diversos y la intensidad de los mismos depende de la cantidad y tipo de sales predominantes, de factores de suelo, del clima, del régimen de lavado y del drenaje.

Aunque las áreas afectadas por salinización originada en la actividad humana están localizadas predominantemente en las regiones áridas y semiaridas se las encuentra afectando vastas zonas de valles, tierras bajas, pie de montes, áreas costeras pero también en tierras altas como en la Sabana de Bogotá en Colombia a 2.600 m de altitud, en las montañas Rocosas en USA a alturas variables, o a más de 5.000 m en el Tibet.

Todas las formas de salinidad reducen la productividad de los suelos y afectan la producción de la gran mayoría de las especies agrícolas de importancia económica para la producción de alimentos, combustibles o fibras. Esto hace que sea de la mayor importancia un manejo que considere el uso de prácticas económicas que hagan posible un manejo sostenible; para ello es necesario tener en cuenta aspectos tales como la respuesta o la capacidad de adaptación de

los cultivos a la salinidad y el uso de materiales de enmiendas de bajo costo y fácil consecución tales como residuos o subproductos industriales o agrarios. Antes de iniciar los procesos de recuperación es indispensable y prioritario realizar una caracterización adecuada del problema de sales y, es de fundamental importancia, la evaluación de la calidad del agua para riego con una predicción acertada del efecto posible que su uso pueda causar en el cultivo y en el suelo.

TIPOS DE SUELOS SALINOS

Debido a diferencias en la intensidad con que han actuado los factores formadores de los suelos en las diversas áreas fisiográficas, se encuentra una gran variabilidad de suelos en las diferentes regiones de América Latina. En todas las formaciones de suelos los efectos de la acumulación de sales solubles en el perfil son diversos y su intensidad depende de la cantidad de arcillas presentes en el suelo, de la magnitud de los procesos de precipitación y evaporación y del régimen de lavado y drenaje de una región dada.

Se acepta, generalmente, que en todas las formaciones de suelos en las cuales las sales solubles en agua juegan un papel dominante determinando sus propiedades físicas, químicas y biológicas, pertenecen a la familia de los suelos afectados por sales independientemente del hecho de que, dependiendo del tipo de sales y de su mineralogía ellos pueden variar en apariencia, morfología, propiedades y las posibilidades de utilización (Zsabolcs, 1995).

Debido a lo anterior ocurren diferentes tipos de suelos salinos que tienen diferentes requerimientos para su rehabilitación y manejo sostenible lo que hace indispensable tener claridad sobre el tipo de afectación. Se distinguen los siguientes tipos de suelos afectados por sales:

Suelos salinos

Se considera que un suelo es salino cuando la concentración de sales solubles - principalmente cloruros y sulfatos y, en casos extremos, nitratos de sodio, calcio y magnesio - en la zona de raíces alcanza

* Profesor Asociado, Universidad Nacional, Sede Palmira. A. A. 237, Palmira - Colombia

niveles demasiado altos para el crecimiento y producción óptimos de las plantas.

Los suelos salinos se desarrollan preferencialmente en aquellas regiones en donde las lluvias son insuficientes para compensar las pérdidas de agua causadas por la evapotranspiración, condición en la cual se favorecen los procesos de concentración y precipitación de minerales en ausencia de un régimen de lavado. También se pueden desarrollar en regiones húmedas bajo condiciones de alta demanda evaporativa, nivel freático superficial y actividad humana.

Puesto que las sales en el agua de riego son uno de los principales causantes de salinización de los suelos la irrigación se debe planear y manejar de modo que se pueda mantener un óptimo balance de sales en la zona radical. Un balance de sales favorable ocurre cuando la cantidad de sales que entran a la zona de raíces es menor o igual a la cantidad que sale en el agua de drenaje.

Suelos Sódicos

Se conocen como tales aquellos suelos de las regiones semiaridas, semihúmedas y húmedas en los cuales predomina el ión Na^+ en el complejo de cambio. En estas condiciones se presenta una reacción del suelo elevada (alto pH), deterioro de las condiciones físicas del suelo especialmente de la capacidad para conducir agua y gases, al tiempo que causa desbalances nutricionales en el suelo que afectan las plantas que se siembren en ellos.

Suelos con alta saturación de magnesio

El ión Mg^{+2} tiene propiedades dispersivas y puede causar efectos adversos sobre las propiedades físicas del suelo en forma similar a como lo hace el sodio intercambiable. En algunas regiones del mundo como en los deltas de los ríos Nilo en Egipto, Sacramento en California o en el valle del río Cauca en Colombia, se han reportado suelos afectados por altas saturaciones de Mg^{+2} en el complejo de cambio. Estos se caracterizan por una reacción alcalina pero con pH menor que en los suelos sódicos, por ser muy plásticos y pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando secos. El Mg^{+2} confiere a estos suelos propiedades físicas indeseables al dispersar las arcillas y la materia orgánica y modifican las propiedades hídricas.

Generalmente, se considera que todos los suelos afectados por una alta saturación de Mg^{+2} pertenecen a una misma clase de grupo sin importar su génesis, las diferencias en los procesos de formación que les

han dado origen, sus propiedades, las fuentes de Mg^{+2} , la forma de enriquecimiento magnésico o el tipo y la movilidad de los compuestos acumulados (Darab, 1994).

Según el mismo investigador el término suelos magnésicos incluye:

1. Suelos en donde el Mg se acumula en forma de sales inorgánicas, principalmente sulfato y cloruro de Mg que son tóxicas para las plantas. Se les conoce como Solonchack (Kovda et al, 1967).
2. Suelos de color oscuro y textura pesada con altas cantidades de Mg (intercambiable, soluble y total), baja conductividad hidráulica y limitada movilidad de la humedad en el suelo. Se conocen como hidromórficos (Emerson y Smith, 1970 y Darab y Remenyi, 1978).
3. Otro grupo presenta una alta saturación de Mg acompañada de una amplia variación en la saturación de Na con todas las características morfológicas del perfil solonetz. Algunos autores resaltan la similitud en el comportamiento de los iones Mg^{+2} y Na^+ en la formación solonetz (Maté, 1955).

En el valle del río Cauca (Colombia) se ha encontrado que aproximadamente 117.000 hectáreas están afectadas por alta saturación de Mg intercambiable; estos suelos se agrupan dentro de 5 tipos principales de perfiles magnésicos que indican la existencia de diferentes procesos de formación dependiendo de la posición fisiográfica, condiciones de clima y suelo, especialmente de la existencia de arcillas expandibles (tipo 2:1) en cantidades elevadas; en algunos suelos de la serie Burigá (Vertisoles) se han encontrado cantidades de arcilla superiores al 90%. (Borrero, García y Gómez 1997; García, Borrero, González y Gómez 1997; García, Borrero y Gómez, 1998).

Suelos ácidos sulfatados

Este tipo de suelos se encuentra principalmente en áreas costeras, deltas y estuarios. Su formación proviene de la presencia de sulfatos en el agua de mar, de hierro en los sedimentos y de una rápida acumulación de materia orgánica, la cual es proveniente de manglares principalmente. Estos componentes junto con condiciones de inundación, conducen a condiciones severas de reducción durante las cuales se puede formar gran cantidad de piritita en el suelo. Al producirse el drenaje los valores de pH de estos suelos son inicialmente neutros, luego ocurre una disminución gradual a medida que se sucede la oxida-

ción debida a la acción de bacterias del género *Thiobacillus* principalmente *T. thiooxidans* y *T. ferrooxidans*. Cuando el pH alcanza el rango óptimo la oxidación se hace más rápida. El pH resultante es tan bajo que la actividad microbial se suprime totalmente. En la oxidación de FeS_2 a Fe^{3+} y SO_4^{-2} se liberan 3 hidrógenos. La mayor disminución del pH se produce si el Fe^{+3} se precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ aunque también sucede si el resultado es la Jarosita ($\text{K Fe}_3(\text{SO}_3)_2(\text{OH})_6$). Esto hace que esos suelos sean de poco valor para la agricultura (Rowell, 1981; Bloomfield, 1981).

El manejo de estos suelos debe propender por el aumento del pH a niveles aceptables. En muchos casos el uso de cales es bastante restringido por problemas de transporte y debe pensarse en el lavado de las soluciones ácidas y en la remoción de la acidez intercambiable mediante inundación con agua de mar.

En algunos casos su recuperación es antieconómica.

La reducción de sulfatos en suelos saturados puede contribuir a la formación de suelos sódicos en la extensión en que se forma Na_2CO_3 . Este se puede reducir si existen un nivel freático cercano a la superficie (menos de 1.50 m) y un suplemento de energía disponible para la reducción de sulfatos. Por acción biológica se produce la reducción de la descomposición de material vegetal y humatos y por oxidación del carbono orgánico se genera CO_2 precursor del CO_3 (Whittig y Janitzky, 1963).

Suelos alcalinos

Hace referencia a aquellos suelos con elevados contenidos de metales alcalino-térreos (cationes básicos) como Na, Ca, Mg, y K. En ellos el pH es generalmente mayor de 7.0.

Suelos calcáreos

Presentan contenidos muy elevados de carbonatos, principalmente de Ca y Mg, el pH es siempre superior a 8.4 y presentan reacción fuerte al HCl 0.1N. En este tipo de suelos se pueden formar carbonatos de muchos metales los cuales imponen límites a la solubilidad de esos iones metálicos y a su disponibilidad para las plantas.

EL EFECTO DE LAS SALES SOBRE LOS SUELOS

Efecto de las sales

La interacción entre la solución del suelo y las partículas de suelo depende del tipo y cantidad de arcillas presentes. Las arcillas del tipo 2:1 merecen especial atención desde el punto de vista de efectos de la salinidad. Cuando una arcilla expandible (como las del grupo de esmectitas) se humedece el agua penetra entre las láminas de la arcilla y causa separación de las mismas, el grado de la cual depende del tipo de cationes intercambiables presentes y de la concentración de la solución.

Las arcillas están formadas por laminillas cargadas negativamente como resultado de los procesos del sustitución isomórfica. Las cargas se encuentran distribuidas uniformemente sobre la superficie y también las hay en los bordes rotos de las laminillas. A las cargas negativas se oponen iones de cargas positivas presentes en la solución del suelo adyacente, las cuales son atraídas electrostáticamente por la superficie cargada negativamente en cuya proximidad se concentran y a medida que aumenta la distancia a la superficie tienden a estar menos concentradas (Talibudeen, 1981). El resultado neto de la distribución de cargas es la formación de una doble capa de iones conocida como la Doble Capa Difusa (DCD) compuesta por las cargas de la partícula arcillosa y por los iones de carga opuesta que los neutralizan (Bohn et al., 1979).

Las superficies de carga negativa atraen iones con una fuerza de atracción que depende de la valencia del ión: los iones divalentes son atraídos por una fuerza dos veces mayor que los iones monovalentes por lo que una DCD compuesta por aquellas es más comprimida. Igualmente, cuando aumenta la concentración electrolítica de la solución disminuye la tendencia de los iones a difundir más allá de la superficie y la DCD se compacta. Cuando se aproximan dos laminillas de arcilla sus DCD se sobrepone y se produce una fuerza de repulsión entre los dos sistemas cargados positivamente, la cual es menor a medida que son más compactas las DCD, o sea cuando aumenta la concentración de sales en la solución y la valencia de los iones adsorbidos.

Debido al movimiento Browniano las partículas colisionan unas contra otras pero se separan a causa de las fuerzas de repulsión. Si la concentración de sales aumenta, las partículas al colisionar pueden pegarse unas a otras y formar grumos que precipitan o sea que se produce floculación o agregación. La concentración mínima de electrolitos que causa agregación se denomina valor de floculación (Shainberg y Letey, 1984). Para una arcilla el valor de flo-

culación depende de la valencia del catión saturante. Van Olphen (1977) determinó los valores de floculación para la montmorillonita en el caso de saturación con Na y Ca siendo de 12 me/L de NaCl y 0.25 me/L de CaCl₂ respectivamente. Para las illitas se han encontrado valores entre 40 y 50 me/L de NaCl y 0.25 me/L de CaCl₂ respectivamente (El-Swaify, 1975).

Efecto del Na intercambiable

En un sistema suelo en el que dominan las arcillas de tipo 2:1 las laminillas se agrupan en unidades mayores denominadas tactoides o cuasicristales las cuales constan de 4 a 9 laminillas en arreglo paralelo con distancias interlaminares de 0.9 Å (Sposito, 1983). El Ca intercambiable adsorbido en las superficies internas de los tactoides no es móvil y no forma una DCD y la arcilla se comporta como un sistema con una superficie reactiva menor.

En un sistema saturado con Na en equilibrio con una solución salina diluida, las laminillas están separadas y dado el carácter monovalente del Na se forman DCD menos comprimidas por lo cual se desarrollan altas presiones expansivas entre las arcillas produciéndose dispersión de las laminillas. Por el contrario, las bajas presiones expansivas separadas en un sistema suelo solución saturado con Ca intercambiable previenen la expansión.

Se ha observado que la illita (no expandible) se dispersa más fácilmente a bajo PSI que la montmorillonita, con valores de floculación de 3.0, 4.0 y 7.0 me/L para ésta y de 6.0, 10.0 y 18.0 me/L para la primera a valores de PSI de 5, 10 y 20 respectivamente (Shainberg y Letey, 1984). Estos datos permiten concluir que los suelos con arcillas illíticas son más sensibles a la dispersión que los suelos con arcillas montmorilloníticas. Cuando se tiene un suelo saturado con Na y Ca la introducción de una pequeña cantidad de Na (PSI > 10) produce poca dispersión y expansión, si el sistema tiene una alta concentración de Ca. A medida que aumenta la saturación de Na se produce dispersión por separación de los tactoides y, luego se inicia el rompimiento de los tactoides produciéndose una expansión intensa; a valores de PSI de 50, aproximadamente, el proceso es completo y el suelo se encuentra completamente disperso y expandido.

La dispersión puede suceder únicamente cuando la concentración de electrolitos está por debajo del valor de floculación o sea cuando se mantiene una baja concentración electrolítica, condición que favorece la descomposición de los cuasicristales. La dispersión promueve el movimiento de partículas al

interior de los poros y la disminución del diámetro efectivo de los mismos, reduciendo la conductividad hidráulica; también puede ocurrir la oclusión total. La expansión de las arcillas también reduce el diámetro de los poros y, por consiguiente, la conductividad hidráulica. Ambos fenómenos son responsables de reducción en el tamaño de los poros y del bloqueo de los mismos en suelos con materiales arcillosos expandibles, pero solamente la dispersión lo es en suelos ricos en minerales no expandibles.

La conductividad hidráulica depende del contenido y tipo de arcilla, de la presencia de agentes cementantes especialmente Fe₂O₃, de la textura, de la conductividad electrolítica y de la RAS.

Los fenómenos mencionados hacen que los suelos dispersos sean difíciles de laborar: al humedecerse se tornan pegajosos y cuando se secan hay formación de costras duras y la penetración del agua se restringe grandemente.

Aunque actualmente existe mucha información que soporta el punto de vista de que el Mg⁺² actúa en el suelo en forma semejante al calcio, también es cierto que muchos otros investigadores han encontrado que el Mg⁺² tiene la capacidad de ayudar a desarrollar niveles de PSI mayores en suelos y en materiales arcillosos. Hay un efecto específico del Mg⁺² intercambiable sobre las propiedades físicas de los suelos causando disminución en la conductividad hidráulica porque tiene características dispersivas. El grado de dispersión aumenta a medida que aumenta la relación Mg:Ca en la solución (García, 1986).

El Mg⁺² intercambiable puede reducir el crecimiento de las plantas debido a un efecto directo de toxicidad. La disminución en la productividad puede atribuirse a una deficiencia de calcio causada por los altos niveles de Mg⁺² en el suelo.

Debido a la existencia de una información contradictoria y a la carencia de un parámetro preciso que permita determinar la posibilidad de peligro potencial para el suelo o los cultivos al usar un agua con una concentración dada de Mg⁺², se recomienda una evaluación cuidadosa de la misma cuando la relación Ca/Mg del agua sea menor que uno. En este caso la determinación del contenido de Ca disponible en el suelo es necesaria para decidir si se debe añadir una enmienda calcítica.

PARAMETROS PARA EL DIAGNOSTICO DE LA SALINIDAD

El diagnóstico de los problemas de salinidad potenciales o existentes, se hace con base en el análisis del extracto de saturación de los suelos y de las aguas de riego y de drenaje. En ellos los principales parámetros predictivos son la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS). Adicionalmente, se debe incluir la determinación de algunos iones debido a su naturaleza tóxica como Na, Cl, B, etc., cuando quiera que existan condiciones potencialmente peligrosas en agua o en suelos, o en regiones en donde se sospeche que estos elementos pueden ser problema.

Condiciones Salinas

El criterio común para el diagnóstico de la salinidad del suelo es la determinación de la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE). La medición de la CE se basa en el principio de que la cantidad de corriente eléctrica transmitida por una solución salina bajo condiciones estándar, es directamente proporcional a la concentración de sales de la solución. Para el efecto se coloca una muestra de solución entre dos electrodos de área conocida, y se hace pasar una corriente eléctrica entre ambos electrodos, se mide la resistencia de la solución bajo estas condiciones y se convierte al recíproco de la resistencia, o sea conductividad. El resultado obtenido se multiplica por una constante de la célula ($\text{cm}/\text{cm}^2 = \text{cm}^{-1}$) la cual elimina el factor geométrico.

La CE resultante tiene unidades de mmhos/cm (mmho es el inverso de la unidad de resistencia: el ohm). Actualmente el Sistema Internacional de Unidades usa como unidad de CE el decisiemen por metro (dS/m) el cual equivale a mmho/cm. Como la CE aumenta aproximadamente 2% por cada grado centígrado de temperatura, se acostumbra referir todos los valores a una temperatura de 25°C para lo cual se usan tablas de conversión de valores (U.S. Salinity Lab., 1954). Los instrumentos de medición actuales dan lecturas termocompensadas directamente.

La CE puede medirse directamente en el sitio utilizando sensores de salinidad colocados in situ, los cuales permiten la medición continua y no disturbada en sitios específicos de un campo dado. Muchos de estos sensores están contruidos dentro de una matriz de cerámica porosa, la cual requiere un período de tiempo apreciable para equilibrarse con la solución del suelo durante el cual se pueden presentar cambios considerables en la composición de la solución. Los sensores son progresivamente insensibles a la CE de la solución del suelo a potenciales mátricos menores de 2 atmósferas, lo que constituye

un inconveniente serio. Otro inconveniente se relaciona con el cambio en las curvas de calibración después de un cierto período de tiempo en el campo.

Como nivel crítico para determinar si un suelo es salino o no, se ha usado tradicionalmente un valor de **CEe** de 4 dSm^{-1} . Debido a que muchos cultivos sufren disminuciones en el rendimiento con valores de **CEe** menores de dicho nivel crítico, como en el caso de la yuca, el frijol, árboles frutales y algunos ornamentales, el Comité de Terminología de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA) recomendó una disminución a un nivel de 2 dSm^{-1} (Bohn et. Al., 1979). Sin embargo, para efectos de manejo de cultivos se debe considerar el nivel crítico de cada especie en particular, al cual se hará referencia en el numeral 6.

Condiciones Sódicas

El criterio tradicional para diferenciar entre suelos sódicos ha sido el de un porcentaje de saturación de sodio intercambiable (**PSI**) igual o mayor que un 15% del valor de la capacidad de intercambio catiónico (**CIC**). Matemáticamente el PSI se calcula usando la siguiente expresión:

$$\text{PSI} = \frac{\text{Na (me/100g)}}{\text{CIC (me/100g)}} \times 100 \quad (1)$$

En la determinación de la CIC existen fuentes de error que hacen que no exista en el presente un método universal de referencia para uso en todo tipo de suelos lo cual conduce a imprecisiones o errores en el cálculo del PSI. (García, 1986). El PSI se puede calcular indirectamente a partir de la RAS. Matemáticamente la RAS se calcula usando la siguiente expresión:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{+2} \text{Mg}^{+2}}{2}}} \quad (2)$$

En donde Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} son determinados en el extracto de saturación y se expresan en me/L.

Los investigadores del U.S. Salinity Laboratory (1954) desarrollaron la ecuación 3 para calcular el PSI a partir de la RAS, así:

$$100(-0.0126 + 0.01475 \text{ RASe})$$

$$\text{PSI} = \frac{\text{Na int}}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \text{ RASe})} \quad (3)$$

Para el efecto obtuvieron la relación entre la RAS y la relación de sodio intercambiable (RSI) para los extractos de saturación de 59 muestras de suelos del Suroeste de los EE.UU., obteniendo la siguiente ecuación :

$$\text{RSI} = -0.0126 + 0.01475 \text{ RASe} \quad (4)$$

La relación de sodio intercambiable se puede calcular :

$$\text{RSI} = \frac{\text{Na int}}{\text{Ca}^{1/2} \text{ int}} = \frac{\text{Na int}}{\text{CIC-Na int}} \quad (5)$$

Los coeficientes de correlación ($r = 0.923^{**}$) y de determinación ($R^2 = 0.852$) dieron bases suficientes para el uso práctico de la ecuación 3. Para la obtención de esta ecuación se eliminaron los datos de los suelos cuyos valores de RSI eran mayores de 1, los cuales corresponden a porcentajes de sodio intercambiables mayores de 50.

García y Castillo (1991) recalcularon los coeficientes de la ecuación 9 para 902 muestras de suelos del Valle del Cauca encontrando una correlación positiva y altamente significativa con un valor de $r = 0.443^{**}$ que se considera bajo. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.196$ indicó que solo en el 19.6% de los suelos estudiados la variación en la RSI está asociada con la RAS.

Con el propósito de ajustar el grado de asociación entre la RAS y el PSI se eliminaron algunos valores extremos ($\text{RSI} > 0.4$ y $\text{RAS} > 40$). Para los 859 suelos remanentes el coeficiente de correlación resultó positivo y altamente significativo con un valor de $r = 0.664^{**}$ mientras que el coeficiente de determinación indicó que la influencia de la RAS sobre la RSI para el 44% de los suelos.

Para los suelos con CE menor de 2.0 dSm^{-1} (781 muestras) los coeficientes de correlación y determinación fueron mayores que los obtenidos para el total de suelos ($r = 0.691$ y $R^2 = 0.477$). Para los suelos con valores de CE entre 2.0 y 4.0 dSm^{-1} (58 muestras) se obtuvo el más alto coeficiente de correlación ($r = 0.713^{**}$), también el más alto grado de asociación entre las variables bajo estudio ($R^2 = 0.509$), mientras que para suelos con CE mayor de 4.0 dSm^{-1} no se encontró ningún grado de asociación

entre la RSI y la RAS. Los resultados anteriores muestran que, en el mejor de los casos, la relación entre el PSI y la RAS se cumple en el 50% de los suelos del Valle del Cauca. Es claro que para suelos Salino-Sódicos con $\text{CE} > 4.0 \text{ dSm}^{-1}$ no hay ningún grado de asociación entre ambas variables.

Una de las posibles causas de esta falta de asociación entre la RAS y la RSI en suelos del Valle del Cauca es la dominancia del ión SO_4^{2-} en la mayoría de ellos (Sampayo, García y Castillo, 1993). La influencia probable de los iones SO_4 en el intercambio catiónico en suelos sódicos no ha recibido mucha atención probablemente a causa de que los SO_4 de Ca y Mg son más solubles que los CO_3 , pero existen algunas evidencias de que suelos y arcillas en equilibrio con soluciones de sulfatos de Na o de Ca presentan valores de RSI mayores que las equilibradas con soluciones de Cl a valores correspondientes de la RAS. Según Rao y colaboradores (1968) este efecto se debe a la formación de complejos de iones pareados del ión SO_4 con Ca y Mg.

Cuando se desee calcular el PSI de la RAS, García y Castillo (1991) propusieron el uso de la ecuación 5.6 que es una simplificación de la ecuación del Laboratorio de Salinidad basada en los coeficientes de selectividad de los Suelos del Valle del Cauca en el intercambio de Ca Na, ($\text{Kg} = 0.01215$) y con la cual se eliminan los interceptos positivos pero de valores muy pequeños que presenta la del USDA.

$$\text{PSI} = \frac{(0.01 \text{ RASe})}{(1 + 0.01 \text{ RASe})} \times 100 \quad (6)$$

Con el propósito de evitar los problemas relacionados con las dificultades mencionadas, se ha propuesto el uso de la RAS del extracto de saturación con un valor crítico de 15 como línea divisoria para la caracterización de los suelos sódicos (Bohn et al., 1979). Este método tiene la ventaja de que se obvian los errores potenciales involucrados en la determinación de la CIC y se disminuye el tiempo y el costo del diagnóstico. La adopción de la propuesta anterior implica la aceptación de que la relación RAS-PSI es de uno a uno y que ella funciona en todo tipo de suelos.

En forma similar a como sucede con el PSI, valores de la RAS entre 10 y 20 se deben considerar como potencialmente peligrosos y se deben examinar cuidadosamente para proponer condiciones de manejo adecuadas. Suelos con un alto contenido de arcillas expandibles tipo esmectitas, como los del Valle del Cauca, no toleran valores altos de la RAS (o de PSI)

mientras que suelos con bajos contenidos de arcilla o con pocas arcillas expansibles pueden soportar valores relativamente altos de la RAS sin que sus condiciones físicas se deterioren. Por ello, se ha propuesto para el Valle del Cauca un nivel crítico de PSI de 7.

RECUPERACION DE SUELOS SALINOS Y SODICOS

La recuperación de suelos salinos, y en particular de los sódicos, es un reto a la tecnología actual, la cual solo dispone de un procedimiento eficaz práctico y económico para eliminar las sales del suelo: el lavado de las mismas. Algunos factores que influyen en el éxito de un programa de recuperación son: a) drenaje inadecuado debido a un nivel freático alto, a conductividad hidráulica restringida en el perfil o a ambos, b) un suplemento inadecuado de agua y c) el costo del agua. En el caso de los suelos sódicos deben considerarse además el costo y disponibilidad de enmiendas a base de Ca para desplazar el Na del complejo de cambio y la dificultad en conseguir una buena penetración del Ca en el suelo al comenzar el proceso de recuperación (Bresler et al., 1982).

Recuperación de Suelos Salinos

El fenómeno básico involucrado en la recuperación es la dilución y movimiento de las sales para llevarlas fuera del perfil radicular. El lavado es el proceso fundamental y el drenaje es indispensable ya sea éste natural, debido a la existencia de buena permeabilidad en suelo y subsuelo, o artificial.

El procedimiento de recuperación es específico para cada caso y depende de factores tales como tipo de suelo (textura y estructura), naturaleza de la salinidad, geología, topografía, suplemento de agua, rotación de cultivos y limitaciones debidas al tiempo (Bingham, 1982).

La cantidad de agua que debe pasar a través del perfil para lavar las sales depende de tres factores: 1) la salinidad inicial; 2) la técnica de aplicación del agua; y 3) la textura del suelo. La técnica de lavado más corriente es la inundación en piscinas que puede ser permanente o intermitente. El riego por aspersión usando grandes volúmenes de agua también se puede usar.

La siguiente ecuación (5.1) describe la reducción en la salinidad del suelo (C/Co) como una función de la cantidad de agua que pasa por cada unidad de suelo durante el lavado (dl/ds : lámina de agua) (Hoffman, 1981).

$$C \quad dl$$

$$\frac{C}{Co} \times \frac{ds}{dl} = K \quad (7)$$

Donde:

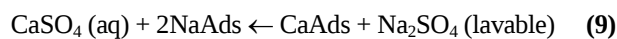
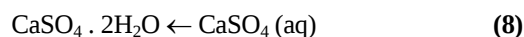
- C: Máxima salinidad permisible (Nivel A, Tabla 1)
Co: CEe inicial
ds: Profundidad efectiva a recuperar (cm)
dl: Lámina de riego (cm)
K: Valor que refleja el contenido volumétrico saturado de agua del suelo y la eficiencia de lavado según el tipo de suelo. Para suelos orgánicos $K = 0.45$; suelos franco arcillosos $K = 0.3$; y arenoso franco $K = 0.1$

Recuperación de Suelos Sódicos

La recuperación de suelos sódicos consiste fundamentalmente en el desplazamiento del Na adsorbido en el complejo de cambio, su reemplazo por Ca y el lavado del exceso de Na de la solución del suelo. Para ello es absolutamente indispensable que se disponga de un drenaje adecuado y es muy conveniente que los suelos conserven alguna permeabilidad remanente para que el lavado sea eficiente, o de lo contrario se deben efectuar labores (subsolada, arado, etc.) que lo faciliten. El Ca necesario puede provenir de:

- 1) La aplicación de enmiendas químicas que lo proporcionan al disolverse. Entre ellas se tienen:
 - a. **El yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).** Su aplicación superficial, aunque mejora la velocidad de infiltración del agua y desplaza el Na, produce efectos lentamente debido a su baja solubilidad, lo que hace necesario el uso de grandes volúmenes de agua para conseguir su disolución, y a su poca movilidad en el suelo. También se puede aplicar con el agua de riego de forma que ésta actúe como vehículo de transporte y distribución.

Las reacciones que representan su acción son:



Estas reacciones indican que simultáneamente se produce disolución de minerales, intercambio de cationes y movimiento de agua y solutos. Debido a ello la velocidad de disolución del yeso depende de factores como profundidad de incorporación y calidad de la mez-

cla, tiempo de contacto entre partículas de la enmienda y del suelo, distribución del tamaño de partículas, contenido de yeso de la enmienda aplicada, velocidad de flujo y capacidad de carga del yeso.

Las reacciones de disolución e intercambio hacen que se remueva Ca de la solución (por precipitación o por reemplazo de Na en el complejo de cambio), lo cual permite que se disuelva más yeso como una función del contenido de Na intercambiable de los suelos (Abrol y Bhumbra, 1979; Oster y Frenkel, 1980). La velocidad de disolución del yeso depende de la diferencia de concentraciones entre la solución en un momento dado y en condiciones de saturación. La primera depende de la cantidad de yeso, del contenido de humedad del suelo, de la velocidad de remoción de Ca^{+2} y de los procesos de intercambio y movimiento de solutos. (Gupta y Abrol, 1990). La disolución del yeso aumenta a medida que la RAS es mayor, aumenta también al incrementar la fuerza iónica de la solución con la formación de iones complejos y pareados y con las concentraciones equivalentes de Ca y Mg.

- b. **Polisulfuros.** El polisulfuro de Ca al tiempo que hace disponibles formas insolubles de Ca a través de la oxidación del S y su posterior conversión a ácido sulfúrico, libera iones de Ca, que quedan en disposición de desplazar el Na que se encuentra saturando las posiciones de cambio de los suelos y que son los causantes del deterioro de las propiedades físicas de los mismos y, especialmente, de su capacidad para conducir el agua.

Debido a su condición líquida y la solubilidad en agua (100% soluble en ella), cuando se aplica con el agua de riego puede penetrar profundamente en el suelo, en donde el S coloidal rápidamente oxidable existente en la solución producirá la acidificación del perfil, incluyendo los estratos inferiores, al tiempo que el Ca liberado produce el desplazamiento del Na intercambiable (Robinson et al., 1968).

Otro efecto importante comprobado de los polisulfuros es el aumento inmediato que producen en la penetración del agua de riego cuando se la adiciona con esta enmienda, o sea que actúan como agentes humedecedores o surfactantes (Howard, 1968). Los polisulfuros más comunes son el amonio y el de calcio. Este último tiene generalmente 145 g/L Ca y 450 g/L de S.

- c. **Enmiendas de alta concentración de electrólitos.** El uso de enmiendas con alta concentración de electrólitos como el cloruro de calcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es una técnica que acelera el proceso de recuperación de suelos altamente sódicos. El uso de este tipo de enmiendas ricas en Ca incrementa considerablemente la permeabilidad del suelo al promover la agregación de partículas de arcilla, pero se produce una disminución en el porcentaje del Ca aplicado que se intercambia por Na, debido a que el intercambio en el interior de las estructuras minerales es lento y a que mucho del Ca intercambia por Mg (Gupta y Abrol, 1990).

Trabajos de algunos investigadores indican que la eficiencia de intercambio es mayor cuando los valores del PSI son elevados (Chaudhry y Warketin, 1968) y disminuye a cerca de un 20% a 40% en suelos con valores de PSI por debajo de 15 (Greene y Ford, 1983; Loveday, 1976).

La eficiencia de recuperación del CaCl_2 aplicado como solución fluctúa entre 63 y 77% (Alperovitch y Shainberg, 1973). La aplicación de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en forma superficial sin incorporación es bastante efectiva, debido a que por su alta solubilidad se produce una gran concentración de Ca que promueve el desplazamiento del Na y el mejoramiento de la permeabilidad. Un inconveniente del uso de este tipo de enmiendas es su residuo salino que hace necesario el lavado del suelo con aguas de buena calidad para eliminar los cloruros que pueden afectar el crecimiento de las plantas.

Trabajos de Marulanda y García (1993), en suelos altamente sódicos del Valle del Cauca, mostraron que la mezcla de CaCl_2 y MgCl_2 es altamente eficiente en el proceso de recuperación, produciendo el despla-

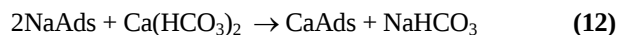
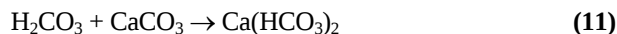
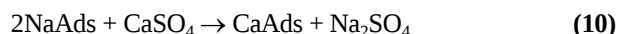
miento de casi todo el sodio adsorbido cuando se usaron soluciones de esas dos sales con concentraciones electrolíticas superiores a 50 me L⁻¹. Posteriormente, García (1997) demostró que las vinazas procedentes de la producción de alcohol se asemejan a soluciones con altas concentraciones de electrólitos y son útiles en el proceso de recuperación de suelos sódicos. En suelos sódicos del Valle del Cauca la aplicación de 2.000m³/ha de vinaza (CE = 11.3 dS m⁻¹, pH = 3.5-4.3) produjo una disminución marcada del Na intercambiable, especialmente de los horizontes superficiales; el efecto agregante y el mejoramiento de la capacidad del suelo para conducir el agua fueron casi inmediatos. Los resultados se aprecian en la Tabla 1.

- d. **Cal.** En regiones en donde la disponibilidad de yeso sea baja es posible utilizar cal. Existe mucha discusión acerca de la utilidad de uso de esta enmienda en suelos alcalinos, ya que su proceso de disolución es lento y depende de factores como área superficial de la calcita, composición del agua del suelo, naturaleza química de los intercambiadores, régimen de temperatura y presión parcial de CO₂.

Los factores anteriores afectan decisivamente el desplazamiento del Na por el Ca proveniente del CaCO₃ en suelos con pH mayor de 8.0 (Yaalon, 1958) haciendo discutible su efecto en la recuperación de suelos altamente sódicos. Por otra parte, la presencia de cal estabiliza los agregados y previene la dispersión de arcillas en suelos con valores de PSI menor de 20 debido a que provoca un aumento de la concentración de electrólitos al disolverse (Shainberg y Gal, 1982; Gupta et al., 1984). Cuando el PSI es alto la calcita no proporciona suficientes electrólitos a la solución del suelo como para contrarrestar el efecto dispersante del Na, aunque sí lo reduce considerablemente (Shainberg y Gal, 1982; Gupta et al, 1984).

- 2) Introducción de una reacción ácida mediante la aplicación de un material formador de ácidos en suelos que contengan carbonatos de silicio y/o magnesio. Las enmiendas de este tipo de uso

más frecuente son el S y el ácido sulfúrico H₂SO₄. La aplicación busca inducir la conversión de CaCO₃ a CaSO₄ y Ca(HCO₃)₂ como se aprecia en las siguientes reacciones:



Para que esto ocurra es indispensable que en los suelos se den las condiciones que favorecen el desarrollo del proceso o sea una adecuada población de microorganismos oxidantes del S (bacterias del género *Thiobacillus*), suficiente porosidad con equilibrio en la distribución de los poros por tamaño, humedad adecuada siendo ideal el mantenimiento del suelo a capacidad de campo, un tamaño de partícula del S que permita la mayor superficie de contacto posible y reactividad con el suelo y un tiempo razonable para que la reacción avance hasta el estado final de la forma SO₄⁻² (García y Castillo, 1993).

Algunas observaciones en suelos del Valle del Cauca que habían recibido tratamientos con S, mostraron que el proceso no se efectúa a igual velocidad en todos los suelos y que, en muchos casos, la enmienda puede permanecer en su forma física original aún un año después de su aplicación. En la Tabla 2 se puede apreciar que el proceso de oxidación del S es progresivo en el tiempo, que existe una mayor eficiencia relativa de oxidación con la aplicación de dosis inferiores a 1000 kg/ha. Aplicaciones superiores hacen que el proceso de oxidación sea más lento. Por otra parte, en los mismos suelos se encontró una relación inversa entre el contenido original de sulfatos en el suelo y la eficiencia de oxidación de S, lo cual hace suponer que el exceso de sulfatos en el medio restringe el proceso de oxidación. Este fenómeno, en principio puede atribuirse a una baja población o a una baja actividad y eficiencia de los organismos oxidantes del S cuando la concentración de sulfatos es alta y, probablemente, también a un desequilibrio químico en el medio bajo esta condición (García y Castillo, 1993).

Tabla 1. Efecto del lavado de los Suelos "El Rincón" y "La Rosaura" con aguas de diferente concentración de electrólitos (*)

Concentración	El Rincón	La Rosaura
---------------	-----------	------------

	pH	CE (dSm ⁻¹)	Na INT. (me/100g)	PSI	pH	CE (dSm ⁻¹)	Na INT. (me/100g)	PSI
0	9.2	7.41	35.45	189.57	10.0	3.20	30.29	125.69
10	9.3	1.13	16.43	79.75	10.0	2.80	22.78	110.58
50	8.2	1.81	1.70	8.90	9.0	1.60	9.94	49.70
100	7.9	2.67	0.19	0.81	8.0	2.64	0.30	1.40
200	7.8	5.01	0.18	0.81	8.0	2.18	0.21	1.01
400	7.8	8.06	0.21	1.00	7.8	9.06	0.15	0.74
600	7.8	8.80	0.21	1.03	7.5	10.57	0.12	0.61

* Preparadas a base de CaCl₂ y MgCl₂
Na int.
** $PSI = \frac{Na\ int.}{CIC} \times 100$
(García, 1997).

Cuando se usan acidulantes, especialmente ácido sulfúrico, en la recuperación de suelos sódicos y de suelos alcalinos en general, la corrosividad y condiciones de manejo de los mismos limitan su aplicación a los casos en que se puede disponer de equipo adecuado.

- 3) Labranza profunda. Algunos investigadores (Rasmussen et al., 1972, Hoffman, 1981), han encontrado que la labranza profunda de suelos sódicos calcáreos es una técnica que da buenos resultados porque mejora la rata de infiltración al romper horizontes compactos o capas que restrinjan el movimiento de agua. Si en el subsuelo se encuentra yeso el proceso de recuperación es más eficiente.

Experiencias de investigadores canadienses (Cairns y Bower, s.f.) demostraron que la labranza profunda, con el propósito de producir una mezcla casi uniforme de horizontes, es mejor que la inversión de capas. Este tipo de práctica produce aumento del crecimiento de los cultivos ya sea que se cause o no un lavado del Na, porque parece tener el mismo efecto que la adición de fertilizantes. Además, se producen cambios en el pH que favorecen la actividad microbiana, especialmente de microorganismos relacionados con la fijación y transformaciones del N y aumenta la disponibilidad de agua para las plantas.

- 4) Evolución de CO₂ proveniente de la respiración de plantas tolerantes. La recuperación de suelos sódicos se pueden facilitar manteniéndolos bajo cultivo. Para el efecto se usan especies tolerantes como el arroz bajo riego, condición que favorece la existencia de mayor presión de CO₂ (pCO₂) y el lavado de las sales resultantes del intercambio del Na por Ca.

El efecto del cultivo mejorando la permeabilidad de los suelos se atribuye a la acción física de las raíces que facilita el movimiento del agua a medida que penetran en el suelo (Goertzen y Bower, 1958); a la remoción de aire atrapada entre los poros conductores grandes (McNeal et al., 1966b) mientras Chhabra y Abrol (1977) consideran que una alta presión del CO₂ favorece la solubilización del CaCO₃ a través de la reacción 7.16:



La producción de CO₂ resulta entonces en movilización de CaCO₃ que es mayor a medida que aumenta su solubilización. Este proceso está acompañado de una reducción del pH y del Na intercambiable (Gupta et al., 1988).

- 5) Uso de aguas altamente salinas que contienen cationes divalentes o adicionadas con yeso. Reeve y Bower (1960) demostraron que un suelo sódico se puede recuperar más rápidamente mediante aplicaciones sucesivas de diluciones de aguas altamente salinas que contengan Ca y Mg. Esto se basa en que la dilución de una solución del suelo en equilibrio químico con un suelo que contenga Na, Ca y Mg intercambiables, favorece la retención de los cationes divalentes y en que después de la dilución el Na es más fácilmente desplazable del complejo de cambio. Esta técnica necesita más estudio principalmente en aquellas áreas en donde no se dispone de aguas con altos contenidos de cationes divalentes, caso en el cual se pueden adicionar con yeso o con cloruro de calcio.

Esta ecuación presenta el inconveniente de que es bastante difícil determinar un valor confiable de la concentración de iones divalentes (Ci) en el agua de drenaje. Trabajos de Keren y O'Conner

(1982), han permitido obtener valores de un rango de 18 a 22 meL⁻¹, que aunque dan como resultado valores estimados de la cantidad de agua requerida para desodificación de un suelo inferiores a los observados, puede usarse para obtener un estimativo aproximado.

Tabla 2. Eficiencia relativa de la oxidación de azufre (S), evaluada en función del porcentaje del S-SO₄⁼ producido respecto al azufre micronizado incorporado en suelos alcalinos del Valle del Cauca.

Tratamiento de S porcentaje de S-SO ₄ ⁼ Respecto al S incorporado ----- días -----						
kg/ha	60	120	180	240	300	360
250	30.2	36.3	34.6	45.0	49.6	53.0
	30.3	22.1	28.0	27.5	36.8	29.2
	42.0	61.1	47.0	45.9	39.4	57.4
500	41.4	48.6	53.5	51.0	62.6	65.0
	35.0	39.5	38.0	32.0	52.4	39.0
	34.0	43.7	50.0	49.8	41.2	37.6
1.000	48.5	60.5	58.1	69.4	66.7	63.4
	32.4	40.8	35.2	42.9	50.3	38.3
	28.4	33.8	27.7	26.8	26.7	24.3
2.000	34.7	43.9	39.7	45.1	46.3	46.3
	35.5	37.7	33.5	30.6	36.3	37.8
	28.2	31.4	23.9	32.2	19.9	26.6
5.000	22.8	24.7	22.5	23.2	24.8	25.3
	24.2	27.6	26.3	24.8	27.1	22.9
	23.9	26.7	24.1	27.7	20.2	22.8

* La primera hilera dentro de cada tratamiento corresponde a 13 suelos no salinos no sódicos con S-SO₄⁼ original menor que 20 mg/kg; la segunda a 5 suelos no salinos no sódicos con S-SO₄⁼ original entre 21 y 48 mg/kg, y la tercera a 2 suelos salino-sódicos con S-SO₄⁼ original de 311.8 y 513 mg/kg.

Requerimientos de lavado

La descomposición de minerales dentro del perfil del suelo es un proceso que libera sales continuamente y que contribuye al proceso de salinización de los suelos, dependiendo la clase de sales liberadas y de la composición del material parental del suelo. En regiones en donde la evapotranspiración excede a la precipitación no hay posibilidades de lavado suficiente de las sales y se produce acumulación de ellas en el perfil radicular, en ocasiones a niveles dañinos para las plantas. Si el nivel freático se encuentra cerca a la superficie también se produce salinización como consecuencia del movimiento capilar de agua

hacia la superficie en donde se evapora dejando atrás las sales.

Las actividades del hombre añaden sales a los suelos en forma continua y pueden causar salinización, como en el caso del riego, aún cuando se utilicen aguas de buena calidad. La sobreirrigación de algunas áreas puede resultar en el transporte y acumulación de sales a áreas vecinas con drenaje pobre o insuficiente. Cuando el riego es insuficiente también se pueden acumular las sales, especialmente, si se usan aguas relativamente salinas, debido a que a medida que las plantas remueven agua durante su ciclo de vida las sales se van concentrando en el suelo.

Un manejo adecuado de riego incluye el uso periódico de excesos de agua para lavar las sales acumuladas en el perfil radicular. Esto involucra los conceptos de lavado de los suelos, de fracción de lavado y el requerimiento de lavado.

El primer término hace referencia a la necesidad de remover las sales remanentes en el perfil radicular después que se han sucedido los procesos de evapotranspiración, haciendo que las sales se muevan hacia abajo para mantener una profundidad efectiva adecuada para el crecimiento normal de los cultivos. Esta es una técnica corriente en regiones afectadas por sales y consiste en la aplicación de un exceso de agua mayor que la necesaria para el desarrollo de las plantas. La cantidad de agua necesaria depende de la concentración de sales en agua de riego y del nivel de salinidad permisible en la zona de raíces.

A medida que la proporción de agua de riego que pasa a través de la zona radicular o fracción de lavado (FL) se incrementa, aumenta la profundidad del suelo que tiene esencialmente la misma concentración de sales que el agua de riego. Al aplicar un volumen dado de agua la solución del suelo se equilibra con el agua de riego presentándose la mayor concentración de sales en el frente húmedo. Por consiguiente, la máxima concentración de sales se encuentra en el agua de drenaje.

Con base en los conceptos anteriores el laboratorio de Salinidad del USDA (1954) sugirió la siguiente ecuación para el cálculo de la fracción de lavado:

$$Fl = \frac{Vad}{Vai} \quad (14)$$

En donde Vai y Vad hacen referencia a los volúmenes de agua de riego y drenaje respectivamente.

Puesto que es difícil aforar los volúmenes de agua de drenaje, se pueden usar las conductividades eléctricas del agua de riego y de drenaje, así :

$$Fl = \frac{CE_{ai}}{CE_{ad}} \quad (15)$$

Cuando se desea calcular la fracción de lavado para un cultivo específico que requiere el paso de una determinada cantidad de agua a través del perfil radicular para prevenir la acumulación de sales a un nivel que pueda afectar las plantas se tiene un requerimiento de Lavado.

$$RL = \frac{Ce_{ai}}{“CE_{ad}”} \quad (16)$$

En donde “CE_{ad}” hace referencia al nivel crítico de salinidad específica para el cultivo dado.

A la ecuación básica le han seguido numerosas modificaciones tendientes a refinar su precisión, cuyo uso junto con la necesidad de ahorrar agua han conducido a una sensible reducción de la fracción de lavado original desarrollada bajo el concepto de la Fracción mínima de Lavado. Una de las propuestas mas usadas es :

$$FML = \frac{CE_{ai}}{2 CE_{e50}} \quad (17)$$

En donde CE_{ai} y CE_e se refieren a la conductividad eléctrica del agua de riego y del extracto de saturación necesaria para producir una disminución del 50% en los rendimientos.

ALGUNAS PRACTICAS ADICIONALES DE MANEJO DE LOS SUELOS SALINOS

En agricultura bajo riego y en climas áridos y semiaridos las plantas crecen en condiciones de un balance bastante fragil con su hábitat, el cual es particularmente sensible a los desbalances provocados por las actividades humanas. Así por ejemplo, es necesaria la existencia de un balance en la relación agua/suelo/planta y en el manejo de cada uno de sus constituyentes, como en el caso de la salinidad en el suelo para no incrementar las condiciones de estrés a

las cuales están sometidas las plantas en dichos ambientes.

Practicas de Manejo del Suelo

En un sistema de manejo integral las siguientes prácticas de manejo de los suelos contribuyen a minimizar o a corregir la acumulación de sales:

Nivelación

Esta práctica juega un papel importante en el control de las sales. Una buena nivelación contribuye a una mejor distribución de la lámina de agua, a la disminución de las pérdidas y a eliminar la acumulación de sales en parches como resultado de la distribución irregular de las mismas.

Subsolación o labranza profunda

Este es un término general que se usa para describir la ruptura, desmenuzamiento y mezclado de capas restrictivas del subsuelo que se encuentran debajo de la profundidad normal de cultivo. La rotura de cualquier estratificación horizontal del suelo mejora la velocidad de penetración hacia abajo del agua, permite una mejor penetración de las raíces, mejora la aireación y facilita el control de la salinidad. Estas prácticas son más efectivas cuando el suelo está seco puesto que se obtiene una mayor rotura de las capas endurecidas (Claypanes, Hardpanes, etc.) o densas.

Labranza mínima

Esta técnica se basa en el mantenimiento de la estructura del suelo reduciendo el tráfico de maquinaria y el laboreo al mínimo para evitar la compactación del suelo. Si se evita la compactación se tiene buen drenaje, buena penetración del agua,

buen aireación y buen desarrollo de las raíces, al tiempo que se pueden realizar eficientemente las prácticas de control de salinidad.

Adición de materia orgánica

Es bien conocido el efecto de la materia orgánica en el mantenimiento de una buena estructura del suelo. La materia orgánica ejerce una profunda influencia en el comportamiento del agua en el suelo aumentando la capacidad de retención de la misma y facilitando su movimiento a través del perfil. En suelos salinos este efecto adquiere importancia fundamental.

En suelos sódicos es necesario tener precauciones con la aplicación de materia orgánica, pues bajo ciertas condiciones la producción de ácidos húmicos o fúlvicos (humificación) puede dar origen a la formación de complejos con el Na que pueden contribuir a la dispersión de arcillas como la montmorillonita. Trabajos recientes de Tarchitzky y colaboradores (1993) han demostrado que los valores de floculación de montmorillonitas sódicas, aumentan con la concentración de sustancias húmicas a varios niveles de pH cuando la concentración de las mismas es inferior a 10 mgL^{-1} . Cuando exceden de esa concentración no se han observado efectos dispersantes excepto en montmorillonitas sódicas a pH 10, en las cuales las concentraciones menores de 10 mgL^{-1} tienen poco efecto en los valores de floculación, pero adiciones mayores de sustancias húmicas elevan el valor de floculación hasta más de 141 mmol L^{-1} .

Preparación de surcos y camas para las semillas

La germinación y los primeros estados de crecimiento son las etapas críticas de la vida de la planta y cuando ella es más sensible a los daños causados por la salinidad. En este período cuando las prácticas de manejo de la salinidad deben ser más eficientes para evitar la acumulación de las sales en el perfil radicular.

La preparación de camas es una práctica convencional que puede resultar muy conveniente en suelos con peligro potencial de salinización. Antes de preparar las camas debe hacerse una buena nivelación (tener en cuenta el sistema de riego a usar). Si hay presencia de capas compactas o endurecidas deben romperse mediante subsolación. Cuando el subsuelo es salino el uso de arado de vertedera puede traer las sales nuevamente a la superficie después de lavado, por lo que se recomienda el uso de arado de cincel.

Muchos problemas de salinización pueden ocurrir en suelos bien drenados cuando se hace riego por surcos. Las sales tienden a concentrarse cerca a los bordes y el centro de los surcos o camas. Para evitar la concentración de sales cerca de la semilla o de la plántula existen varios procedimientos: 1) Aplicación de un riego de presiembra y siembra de la semilla en las pendientes o lados de la cama o surco. 2) Riego de cada tercer surco. 3) Construcción de camas dobles y riego de surcos alternados. En este caso se acumula la sal en el surco no regado dejando libre el área de colocación de las semillas. 4) Siembra en la pendiente de camas inclinadas. Esta es una práctica muy conveniente pero tiene el inconveniente de requerir modificaciones de la maquinaria y de las prácticas culturales.

La lluvia puede causar movimientos de sales incontrolados. Durante las etapas críticas del cultivo y dependiendo de la intensidad de las lluvias, las sales se pueden movilizar hacia abajo en el perfil y acumularse en el cuello de la raíz o en el área de raíces. Ambas situaciones causan daños de consideración. En este caso se debe recurrir al riego inmediatamente para diluir las sales y llevarlas lejos de la planta.

Cuando se tienen suelos altamente dispersos debido al excesivo lavado de las sales por lluvias intensas, es conveniente la adición de aguas salinas para restaurar la floculación del suelo.

Prácticas adicionales de Manejo del Agua

Básicamente debe tenerse en cuenta que:

- a. Las sales se acumulan en la superficie o cerca de ella como resultado de la evaporación y subsiguiente ascenso capilar del agua.
- b. Las sales se mueven con el agua en el suelo y se acumulan en el frente húmedo.
- c. Los períodos más críticos y cuando es más importante tener un control estricto del problema salino son la germinación de la semilla y la emergencia de las plántulas.

Técnicas de riego

Para evitar la acumulación de sales en la superficie como resultado del uso del riego por gravedad puede usarse el riego por aspersión. Este requiere el uso de agua de muy buena calidad para prevenir daños al follaje como consecuencia de la concentración de sales, especialmente cloruros y sodio, sobre la superficie de las hojas. Cuando no se cuenta con agua de muy buena calidad se pueden usar algunas técnicas complementarias para evitar el daño foliar tales como riegos nocturnos, uso de aspersores pequeños y de rotación rápida, movimientos de las tuberías siguiendo la dirección del viento y del uso de aspersores con un ángulo de aspersión pequeño.

En toda situación se debe considerar el manejo del lavado planeado siempre que la aplicación de un exceso de agua que permita llevar las sales más allá del perfil radicular. Entre más eficiente sea el sistema de riego que se utilice más atención se debe dar al lavado para prevenir la salinización del suelo.

MANEJO DE LA FERTILIDAD EN SUELOS SALINOS

En los suelos salinos se pueden producir varios tipos de efectos causados por el exceso de sales que pueden afectar la fertilidad de los suelos: a) Haciendo más negativo el potencial osmótico del agua del suelo lo cual dificulta su absorción y la de los iones que en ella se encuentran disueltos. b) Causando toxicidades a las plantas por la presencia de excesos de iones como Na, Cl, Mg, SO_4 , B. c) Promoviendo la inducción de desbalances nutricionales; o, d) Afectando a los cultivos a través de efectos combinados de las anteriores causas.

Los suelos alcalinos, y los sódicos en particular, se pueden considerar como de baja fertilidad debido a que varios nutrimentos esenciales para las plantas están poco disponibles en condiciones de alcalinidad. A continuación se presentan algunos aspectos referentes a varios de los nutrimentos esenciales bajo condiciones de salinidad.

Nitrógeno

La disponibilidad de N es bastante baja en suelos alcalinos. En los suelos sódicos debido a la dispersión de la materia orgánica las cantidades de N presentes son inadecuadas para el sostenimiento de los cultivos. La aplicación de fertilizantes amoniacales (Fosfato mono-amónico, fosfato diamónico, sulfato de amonio) o de urea en suelos de reacción alcalina, es bastante ineficiente debido a pérdidas por volatilización en forma de NH_3 . Cuando la urea es hidrolizada a amonio y CO_2 por la enzima ureasa se producen pérdidas de N por volatilización. Debido a lo anterior, los fertilizantes amoniacales deben incorporarse inmediatamente después de su aplicación.

Las sales pueden dificultar la absorción y asimilación de algunos nutrimentos impidiendo procesos afuera o dentro de la planta. Así, experimentos de Torres y Bingham (1973) realizados con el propósito de evaluar el efecto del NaCl en la absorción y asimilación de NO_3 y otros elementos por plantas de trigo, permitieron demostrar que existe un efecto negativo del NaCl sobre la absorción de NO_3 , incremento en la actividad de la nitrato reductasa, aumento de la salinidad por la adición de fertilizantes o combinación de todos estos efectos.

Fósforo

Muchos suelos alcalinos presentan, al analizarlos, contenidos elevados de P disponible y P soluble en

agua. Recientemente Gupta et al., (1989) demostraron en los suelos sódicos calcáreos se produce liberación de P la cual se ve estimulada por el nivel de electrólitos, la saturación de Na, el pH y la presencia de alcalinidad. Estos contenidos de P pueden ser suficientes para la nutrición de plantas por varios años. Este efecto puede persistir después de la recuperación, en especial, si en ésta se ha usado yeso como enmienda. Parece que al aumentar el nivel de yeso adicionado se produce una disminución del P extractable y una disminución en las pérdidas de P por lavado (Chhabra et al., 1981).

En los suelos calcáreos fuertemente sódicos casi todo el P se encuentra ligado al Ca en formas de tipo apatítico y también como feldespatos, plagioclasa, clorita y cuarzo. Estas formas pueden sufrir transformaciones en el suelo a causa de los procesos de meteorización. Si los suelos están bajo cultivo se presenta disminución de estas formas y aumento de las fracciones orgánicas y, si no, predominan las fracciones inorgánicas.

Potasio

Los suelos alcalinos generalmente presentan contenidos adecuados a altos de K. La predominancia de minerales micáceos (Biotita, muscovita, etc.) en dichos suelos hace que, a través de procesos de intercambio como el de Na-K en la biotita o la disolución de unidades estructurales de muscovita (Pal, 1985), se libere suficiente K como para satisfacer las necesidades de las plantas en suelos sódicos. Por ello no se han encontrado respuestas a las aplicaciones de K en muchos cultivos como el arroz.

Bajo condiciones de suelos salino-sódicos la concentración de Na^+ en la solución del suelo para alcanzar niveles desproporcionados respecto a la concentración relativa de K^+ . La reacción Na/K en los tejidos foliares es sumamente importante en términos del mantenimiento de un suministro adecuado de K a las regiones meristemáticas a pesar de los niveles elevados de Na que lo afectan por competencia y toxicidad potencial (Lauchli y Epstein, 1985).

En algunos cultivos como en el caso del banano y de la caña de azúcar, la toxicidad de Na presenta síntomas que son difíciles de diferenciar de los de deficiencia de K. Esto es debido a que el K^+ compite con el Na^+ en el interior de la planta y puede causar inhibición de sus funciones al tiempo que se acumula a niveles tóxicos.

La fertilización con K^+ ayuda a la planta a excluir el Na a nivel de absorción en las raíces, manteniendo

las partes aéreas con concentraciones relativamente bajas del mismo. En el interior de la raíz se pueden formar quelatos de Na que lo hacen inactivo (Lauchli y Epstein, 1985). Este tipo de mecanismos se ve favorecido por fertilizaciones potásicas elevadas.

Elementos menores

Los suelos alcalinos generalmente son deficientes en elementos menores pero sus respuestas a la fertilización con micronutrientes son variables.

En algunas zonas del Valle del Cauca en Colombia la respuesta a la aplicación de elementos menores depende de la fuente usada. Cuando se utilizan sulfatos, generalmente no se observan efectos positivos por lo cual se recurre a la fertilización foliar y al uso de quelatos. Este efecto puede deberse a: a) que el anión dominante en la gran mayoría de los suelos sódicos de la región es el SO_4^{2-} y al aplicar un elemento menor en forma de sal sulfatada no se dan las condiciones necesarias para que se suceda la disociación de la misma, por lo que el ión metálico no es disponible para las plantas. b) Las condiciones de alcalinidad predominantes en el suelo y, especialmente, la formación de NaOH y sus posteriores disociación y precipitaciones, causan reducción en la actividad de los micronutrientes. En el caso del Fe se promueve la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, forma en la cual no es utilizable por las plantas lo que se manifiesta como clorosis férrica.

Al contrario de lo que sucede en el Valle del Cauca, en otras regiones del mundo los suelos calcáreos que tienen valores de pH de alrededor de 8.0 se caracterizan por su respuesta positiva a la aplicación de Zn (Singh y Abrol, 1986); en muchos de ellos este juega un papel determinante en la tolerancia de los cultivos de Na. La naturaleza química de los suelos y el pH parecen ser los mecanismos que gobiernan la actividad de Zn. (Singh et al., 1983).

Aunque la concentración de Zn puede ser elevada en algunos suelos altamente sódicos, se ha comprobado que el nivel de sodio tiene poco o ningún efecto sobre la solubilidad del Zn siendo el pH el que regula la solubilidad del Zn (Singh et al., 1983).

En suelos en recuperación la clase de enmienda que se use afecta la concentración de Zn en la solución debido a la reducción del pH que depende del tipo de enmienda usado. El uso de yeso reduce la sodicidad, floclula las arcillas y la materia orgánica dispersa y promueve la precipitación del Zn orgánicamente complejoado, por lo que incrementa las formas adsorbidas específicamente y que son poco desorbibles.

Así, mientras las propiedades físicas pobres y la retrogradación de precipitados limitan el suministro de Zn a las cosechas en condiciones del alto pH, la coprecipitación y las reacciones de adsorción específica mitigan el efecto benéfico del aumento en solubilidad del Zn al disminuir el pH durante la recuperación.

Puesto que la fertilización con dosis elevadas de Zn conduce a la formación de formas estables y poco solubles, la aplicación regular de Zn en dosis pequeñas es una práctica de manejo más eficiente.

Algunos problemas adicionales en suelos calcáreos son ocasionados por el uso de EDTA como agente quelatante, ya que éste es calcícola. Al ponerlo en este tipo de suelos libera al ión quelatado para producir quelatos de Ca.

El uso de materia orgánica puede causar efectos diversos en suelos sódicos, ya que el Na promueve la dispersión de formas solubles de la materia orgánica descompuesta, la cual puede producir inmovilización de elementos menores y hacer más crítica la disponibilidad de los mismos.

Puesto que la salinidad puede ser la causa de muchas deficiencias nutricionales es natural tratar de corregirlas mediante la aplicación de fertilizantes que contengan los nutrientes deficientes. Sin embargo, es posible que bajo determinadas condiciones el efecto de un fertilizante no sea el esperado sino que por el contrario sea contraproducente, ya que se pueden producir efectos interactivos salinidad-fertilidad.

Experimentos de Bernstein et al (1973), Cerda et al (1977) y Cerda y Bingham (1979), demostraron que la aplicación de P en dosis crecientes a cultivos de maíz, algodón y tomate en arena o en soluciones nutritivas, agravaron los daños causados por las sales y promovieron disminuciones en el nivel de tolerancia a las sales debido a que el P produjo efectos tóxicos adicionales a los de la salinidad. El mecanismo de daño en estas condiciones se puede explicar en términos de acumulación de P, Na o Cl en el agua y tejidos celulares.

En general, puede concluirse que en muchos casos la fertilización puede incrementar el estrés salino y que cuando se tienen niveles de deficiencia los efectos de salinidad no son atemperados por la fertilización.

BIBLIOGRAFIA

Abrol, I.P. , and Bhumbra, D.R., 1979. Crop responses to differential gypsum applications in a highly sodic soil and the tolerance of several

- crops to exchangeable sodium under field conditions. *Soil Sci.* 127 :79 -85.
- Alperovitch, N., and Shainberg, I. 1973. Reclamation of alkali soils with CaCl_2 solutions. pp. 431-440. In : A Hadas (De) Physical aspects of soil, water and salts in ecosystems. Springer-Verlag, Berlin.
- Bernstein, L. and Fracois, L.E. 1973. Leaching requirement studies : sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37 : 931-943.
- Bloomfield, C. 1981. The translocation of metals in soils. In : The chemistry of soil processes. D.J. Greenland and M.H.B. Hayes (Eds). John Wiley and Sons. Ltd. pp. 463-503.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L. and O'Connor, G.A. 1979. *Soil Chemistry*. New York. Wiley interscience. 329 pp.
- Borrero, J. ; García, A. y Gómez, C.A. 1997. Suelos afectados por Magnesio en el Valle del Cauca. *Memorias IV Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la caña de azúcar*. Cali, Septiembre 97. pp 305-315.
- Bresler, E., McNeal B.L. and Carter D.L. 1982. *Saline and Sodic Soils*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. 236p.
- Cairns, R.R., and Bower, W.E. (S.F.) *Solonetzic Soils and their Management* Solonetzic Soil Substation. Canada Dept. Agr. Publ. No. 1391. 37p.
- Cerda, A., Bingham, F.T. and Hoffman, G.J. 1977. Interactive effect of salinity and phosphorus on sesame. *J. Soil Sci. Amer.* 41 : 915-918.
- Cerda, A., Bingmam, F.T. 1979. Yield mineral compositium and salt tolerance of tomato and wheat as affected by NaCl and P.nutrition. *Agrochemica*. XXII :140-149.
- Chhabra, R. and Abrol, I.P. 1977. Reclaiming effect of rice grown in sodic soils. *Soil Agron. J.* 124 :49-55.
- Chaudry, G.H., and Warketin, B.P. 1968. Studies of exchange of sodium from soils by leaching with calcium sulfate *Soil. Sci.* 105 : 190-197.
- Darab, K. and Remenyl, M. 1978. The role of clay mineral composition in the formation and properties of some magnesium soils. *Agrokemia es Talajtan.* 27 :357-378.
- Darab, K. 1994. Magnesium in Salt affected soils. *Agrokemia es Talajtan.* 43 : 133-158.
- El-Swaify, S.A., and Emerson, W.W. 1975. Changes in physical properties of soil clays due to precipitated aluminium and iron hydroxides : 1. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 39 :106-1063.
- Emerson, W.W. and Smith, B.H. 1970. Magnesium organic matter and soil structure. *Nature* 228 :453-454.
- García, A. 1986. Cation exchange in some soils in Northern California. Ph.D. Dissertation. University of California, Riverside. 133p.
- García, A. 1997. Sodic Soils Reclamation using vinasses. *Proceedings of the International Symposium on Salt-affected Lagoon Ecosystems (ISSALE-95) Valencia (Spain).* 18-25 Septiembre/95. pp. 137-143.
- García, A. y Castillo, L.E. 1991. La relación RAS-PSI en suelos del Valle del Cauca. *Suelos Ecuatoriales Vol. XXI (2) :21-26.*
- García, A. y Castillo, L.E. 1993. Oxidación del azufre en suelos alcalinos del Valle del Cauca. En : *Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. pp: 473-505.
- García, A., Borrero, J. Y Gómez, C.A. 1998. Hacia una nueva clasificación de suelos en el Valle del río Cauca. *Memorias Seminario Taller "Hacia conceptos integrales en la conservación de suelos y aguas en la zona andina"*. CIAT Palmira. 13-17 Octubre/97 (En prensa).
- García, A., Borrero, J. ; Gonzalez, L.C. and GOMEZ, C.A. 1997. Magnesic soils in the Valley of the Cauca River (Colombia). *Proceedings of the International Symposium on sustainable management of salt affected soils in the arid Ecosystems. Cairo, Egypt. September 22-28/97*.pp. 111-113.
- Goertzen, J.O., and Bower, C.A. 1985. Carbon dioxide from plant roots as a factor in the replacement of absorbed sodium in calcereous soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 22 :36-37.
- Greene, R.S.B., and Ford, G.W. 1983. The effect of gypsum on cation exchange and leaching in two red wheat soils. *Aust. J. Soil Res.* 21 : 187-193.
- Gupta, D.K., Bumbala, and Abrol, I.P. 1984. Effect of soil pH, organic matter and calcium carbonate on the dispersion behavior of alkali soils. *Soil Sci.* 137 :245-251.
- Gupta, R.K., Singh, R.R. and Abrol, I.P. 1988. Influence of simulations changes in sodicity and pH on the hydraulic conductivity of an alkali soil under rice culture. *Soil Sci.* 146 : 395-402.
- Gupta, R.K., and Abrol, I.P. 1990. Affected Soils : their. Reclamation and management for crop production. In : *Advances in Soil Science Vol. II ; Soil degradation* LAL, R. and Stewart, B.A. editors. Springer-Verlag. New York, Inc. pp. 224-288.

- Hoffman, G.J. 1981. Guidelines for reclamation of salt-affected soils. Proc. InterAmerican Salinity and water Management Technology Conference. Juarez, Mexico, 11-12 December 1980. pp. 49-64.
- Hoard, F.K. 1968. Liquid fertilizer in the Imperial Valley. Fertilizer Solutions. 12(3) :32-33, 35.
- Jury, W.A., Jarrel, W.W. and Devitt, D. 1979. Reclamation of saline-sodic soils by leaching. Soil Sci. Amer. J. 43 :1100-1106.
- Keren, R. and O'Connor, G.A. 1982. Gypsum dissolution and sodic soil reclamation as affected by water flow velocity. Soil Sci. Soc. Amer. J. 46 :726-732.
- Kovda, V.A., van den Perg, C. and Hagen, R.M. (eds). 1967. International Source Book on Irrigation and Drainage of Arid Lands in Relation to Salinity and Alkalinity. FAO. UNESCO.
- Lauchli, A., and Epstein, E. 1985. Cereal-crop. Response to chloride and sulfate salinity and interaction with root Aeration In : Soil and Plant interactions with salinity. Kearney Foundation Five-year Report. 1980-1985. Pp. 22-28.
- Loveday, J. 1976. Relative significance of electrolyte and cation exchange effects when gypsum is applied to a sodic clay soil. Aust. J. Soil Res. 14 :361-371.
- McNeal, B.L., Norvell, W.A. and Coleman, N.T. 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity and on the swelling of extracted soil clays. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30 :308-317.
- Marulanda, E. y García, A. 1993. Efecto de la concentración de electrolitos en el agua de riego en la recuperación de suelos sódicos. Suelos Ecuatoriales Vol. 24 :33-36.
- Mate, F. 1955. Magnesium ion accumulation in the adsorption complex of meadow soil of the Tiza Valley. Agroquímica y Talajtan 4 : 291-298.
- Oster, J.D., and Frenkel, H. 1980. The chemistry of the reclamation of sodic soils with gypsum and lime. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. J. 44 :41-45.
- Pal, D.K. 1985. Potassium release from muscovite and biotite under alkaline conditions. Pedologie 35 : 133-136.
- Rasmussen, W.W., Moore, D.P. and Alban, L.A. 1972. Improvement of solonchic (Slick Spot) soil by deep plowing, subsoiling, and amendments. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36 :137-142.
- Reeve, R.C. and Bower, C.A. 1960. Use of high salt waters as a flocculant and source of divalent cations for reclaiming sodic soils. Soil Sci. 90 :139-144.
- Rhoades, J.D. and Ingvalson, R.D. 1971. Determining salinity in yield soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35 :54-60.
- Robinson, F.E., Cudney, D.W. and Jones, J.P. 1968. Evaluation of soil amendments in Imperial Valley, California Agric. 22(2) :10-11.
- Rowell, D.L. 1981. Oxidations and reductions in the chemistry of soil processes, D.J. Greenland and M.H.B. Hayes eds. John Wiley and Sons. Ltd. pp. 401-462.
- Sampayo, J.T., García, A. y Castillo, L.E. 1993. Algunos aspectos de la dinámica e interacciones iónicas de suelos salinos del Valle del Cauca. I. Especies libres y formación de complejos. Suelos Ecuatoriales Vol. 24 :37-45.
- Shainberg, I. and Letey, J. 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. Hilgardia 52 : 1-57.
- Shainberg, I., and Gal, M. 1982. The effect of lime on the response of soils to sodic conditions. J. Soil Sci. 33 :489-498.
- Singh, M.V., and Abrol, I.P. 1986. Transformation and movement of zinc in an alkali soil and their influence on the yield and uptake of zinc by rice and wheat crops. Plant Soil 94 : 445-449.
- Singh, M.V., Chhabra, R.R. and Abrol, I.P. 1983. Factors affecting DTPA extractable zinc in sodic soils. Soil Sci. 36 :359-366.
- Spisito, G. 1983. The surface chemistry of soils. University of California, Riverside. In Press by Clarendon Press, Oxford.
- Talibudeen, O. 1981. Cation exchange in soils. In : The chemistry of soil processes. Edited by D.J. Greenland and M.H.B. Hayes. John Wiley and Sons. pp. 115-117.
- Tarchitzky, J., Chen, Y. and Banin, A. 1993. Humic Substances and pH effects on Sodium - and Calcium - montmorillonite flocculation and dispersion. Soil Science Society of America Journal. Vol. 57(2) : 367-372.
- Torres, C., and Bingham, F.T. 1973. Salt tolerance of Mexican Wheat : I. Effect of NO₃ and NaCl on mineral nutrition, growth and grain production of four wheats. Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 37 : 711-715.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handbook No. 60. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C. 160 p.
- Van Olphen, H. 1977. An introduction to clay colloid chemistry. 2nd. Ed. New York. John Wiley & Sons.

- Whittig, L.D., and Janitzky, P. 1963. Mechanisms of Formation of sodium carbonate in soils. I. Manifestations of biological conversions. J. Soil Sci. 14 : 322-333.
- Yaalon, D.H. 1958. Studies on the effect of saline irrigation water on calcareous soils. II. The behavior of calcium carbonate Bull. Res. Council Isr. 76 : 115-122.
- Zsabolcs, I. 1995. Global overview of sustainable management of salt affected soils. Proceedings of the international workshop on integrated soil management for sustainable use of salt affected soils, Manila, Filipinas. Nov. 6-10/95. pp. 19-38.

PREPARACION Y DESINFECCION DE SUELOS

Edgar Amezcuita *

INTRODUCCION

La preparación del suelo consiste en la manipulación oportuna y acertada de éste, de tal manera que se le logre dar el mejor ambiente físico, químico y biológico para que las raíces de las plantas puedan crecer sin limitaciones y extraer de él las sustancias nutritivas que requieren para poder expresar su máximo potencial genético de producción dentro del ambiente agroecológico en que se desarrollan.

El resultado final de la preparación de suelos debe ser, el de crear un ambiente equilibrado y dinámico entre las fases sólida, líquida y gaseosa del suelo, de tal manera que se logre conseguir el ambiente ideal, que a nivel de suelo requieren las raíces de las plantas para su pleno funcionamiento.

OBJETIVO

El objetivo de este manual, es el de escribir los lineamientos más importantes que tienen que ver con la preparación de suelos para flores, advirtiendo que las decisiones en preparación y adecuación de suelos deben basarse en una evaluación objetiva del suelo problema en cada unidad de producción para decidir sobre qué correcciones es necesario hacerle y cómo utilizar sus potencialidades.

METODOLOGIA

Desde el punto de vista, de manejo físico conviene dividir al suelo dependiendo de sus características texturales y de las propiedades que las partículas originan en él en: suelos pesados, suelos medios y suelos ligeros.

Esta división permite en forma macro predecir las potencialidades y limitaciones de los suelos originadas por la dominancia textural y visualizar de una manera general sobre el tipo de prácticas de manejo que deben hacerse al suelo para asegurar su alta capacidad productiva.

Los suelos pesados de tendencia arcillosa, pegajosa, de baja capacidad de infiltración, de mal drenaje, difíciles de laborar, de baja capacidad de difusión de aire y por lo tanto de baja capacidad productiva. Presentan sin embargo, alta capacidad de intercambio catiónico y alta capacidad de retención

y almacenamiento de agua. A manera de ejemplo pueden citarse suelos presentes en Jayvana. El Roble. La Valvanera y el Cacique.

Los suelos medios o francos presentan buenas características físicas, químicas y biológicas para la producción agrícola, pero pueden presentar problemas de compactación, de pérdida de estructura, y de encostramiento superficial. Como ejemplo se pueden citar suelos presentes en la Mana. Flores del Hato, El Tandil, Canelón y Fredonia I. Estos suelos exigen un manejo conservacionista de su estructura.

Los suelos livianos son suelos de texturas arenosas, de muy baja capacidad de retención de agua y de nutrientes: de alta infiltración y permeabilidad, no plásticos, no pegajosos y de fácil laborabilidad.

Requieren de alta frecuencia de riego y de fertilización frecuente.

Originalmente no existen en las Sabana de Bogotá suelos de comportamiento arenoso propiamente dicho. Existen en cultivos de flores suelos que por adición de enmiendas físicas (cascarilla, escoria etc.) hoy exhiben el comportamiento de suelos livianos: Río Frío, Jardines de Chia y M.G. en flores de Bojaca se presentan suelos originales de tendencia arenosa.

En producción agrícola es conveniente dividir los poros del suelo por su tamaño en macro, meso y microporos como una forma de expresión de la estructura funcional del suelo, la cual precisamente se busca modificar hacia macroporosidad con la adición de enmiendas físicas y labranza.

OBJETIVOS GENERALES DE LA PREPARACION DE SUELOS

1. Garantizar que la profundidad efectiva a 50cm. para no tener problemas de drenaje.
2. Garantizar una buena difusión de oxígeno dentro de los primeros 0-40 cm. con una buena aplicación de enmiendas físicas.
3. Garantizar una buena y oportuna suplencia de nutrientes.

* Físico de Suelos. CIAT. A. A. 6713, Cali – Colombia.

4. Garantizar un buen almacenamiento de agua útil durante el desarrollo del cultivo.
5. Garantizar condiciones físicas y químicas adecuadas para que haya un buen desarrollo de raíces.
6. Garantizar la sostenibilidad del suelo y del cultivo.

PARA PODER CUMPLIR CON ESTOS OBJETIVOS SE DEBEN SEGUIR EN GENERAL LOS SIGUIENTES PASOS

- a. Hacer cajuelas (50*50*50*cm.) para estudiar la distribución de capas y observar las profundidades a las cuales se presentan problemas.
- b. Tomar muestras de suelo para análisis químico, físico y biológicos (presencia de patógenos) tres meses de la siembra.
- c. Hacer o disponer de un levantamiento topográfico con cotas cada 25cm. para estudiar la localización y el manejo de los drenajes externos e internos y calcular las necesidades y cantidades de relleno y nivelación si es necesario hacerlos.
- d. Diseñar y ejecutar el sistema de drenajes y de las adecuaciones de tierra que sean necesarias.
- e. Preparar el suelo de tal manera que su labranza garantice las condiciones de exigencia de las plantas en los primeros 0 a 50cm. de profundidad. Este punto incluye las condiciones de cascarilla, correctivos y de otras enmiendas físicas.
- f. Para una buena aplicación de cascarilla se propone seguir los siguientes pasos:
 1. Contar con invernaderos cubiertos.
 2. Verificar la capacidad del camión transportador en metros cúbicos.
 3. Descargar la cascarilla en sitios específicos de almacenamiento o frente a la nave. Nunca descargarla dentro de la nave para evitar la formación de colchones.
 4. Antes de aplicar la cascarilla el suelo debe estar suelto superficialmente para facilitar su incorporación, debe estar nivelado y

con los correctivos requeridos. Para la preparación, el suelo debe estar con un contenido de humedad inferior a punto adhesivo, pero nunca seco.

5. La cascarilla debe distribuirse en montones iguales por cada cuadro de nave, y debe ser medida utilizando un cajón de madera liviana de 1m. cúbico o con otros recipientes aforados que garanticen la aplicación de las cantidades que se deben aplicar. Este aforo debe ser estrictamente supervisado y aprobado por el responsable del área.
6. Una vez distribuida en montones, la cascarilla debe ser esparcida uniformemente sobre la superficie del área del cuadro y comprobarse la profundidad de la capa aplicada.
7. Esparcidos los correctivos y la cascarilla se procede a incorporarlos con arado de discos, rastrillo y con cincel rígido el cual a su vez cumple la función de aflojar el suelo en profundidad. El cincel debe hacer un primer pase superficial (0-30cm) a una separación de 60 cm entre cinceles. Posteriormente otro a 45 cm. de profundidad en el punto medio de la pasada anterior. A este estado el suelo debería estar flojo. Si no se ha conseguido este objetivo, se debe pasar el cincel de nuevo a 45 cm. de profundidad y en los puntos medios del pase anterior.

Una vez incorporados los correctivos y la cascarilla, se hacen drenajes de fondo de cama donde sea necesario. doble paleo, se nivela la cama, se aplican los fertilizantes, se incorporan con gancho o motoazada, se levantan las camas, se humedece el suelo, se marca y se siembra.

Atención especial debe darse al doble paleo. Es tan importante, que si no se hace o no se hace bien no se puede garantizar la profundidad de incorporación de las enmiendas y la cascarilla, ni la uniformidad de la cama y menos la productividad del cultivo.

Cuando se va a recibir una cama, el técnico debe chequear la oportunidad de preparación y la uniformidad en la distribución de correctivos cascarilla. En caso de que no esté satisfecho con el trabajo realizado, no

debe recibir las camas y el trabajo debe repetirse. Una cama homogénea garantiza las condiciones para un excelente manejo de agua y de fertilizantes durante el período de utilización del suelo.

En los casos en que la condición topográfica lo amerite, es necesario hacer drenajes de fondo de cama. La elaboración de estos drenajes es absolutamente indispensable en las partes bajas y en suelos salinos, para poder manejar estos dos factores negativos en la producción, pero son recomendables para todas las camas.

Los drenajes de fondos de camas consisten en zanjas pequeñas que se hacen en el centro y a lo largo de la cama, con el objetivo de evacuar los excesos de agua, de sales y de mejorar la aireación.

Las zanjas se rellenan con cascarillas, escoria u otros materiales o mezclas. Su importancia en flores radica en que aseguran la sostenibilidad de suelo y de los cultivos.

ESQUEMA DE LA SECUENCIA DE ACTIVIDADES EN LA ADECUACION Y PREPARACION DE SUELOS ARCILLOSOS Y DESCRIPCION DE ELLAS

Con el fin de resumir y visualizar mejor las actividades conducentes a la obtención de un suelo arcilloso adecuado y preparado para la siembra de flores, se presenta el esquema de la figura 1 que muestra la secuencia de actividades que usualmente deben seguirse para lograr el objetivo de salir de un suelo de escasa capacidad productiva y llevarlo a alta capacidad productiva.

A continuación se hace una descripción de cada una de las actividades indicadas en el esquema.

- a) **HISTORIA DE USO:** es necesario conocer el uso anterior del suelo para deducir que tipo de problema de orden físico, químico o biológico puede tener y qué medidas curativas o preventivas deben planearse y ejecutarse, para prevenir efectos negativos en la próxima siembra de flores.
- b) **CAJUELAS Y MUESTREO:** la cajuela consiste en un ovo de 50*50*50 cm para observar la distribución de los horizontes y la profundi-

dad del suelo y evaluar los problemas de orden físico, químico y biológico que puedan presentarse.

Las siguientes características físicas deberían evaluarse:

- Profundidad a la cual se consiguen cambios en color, textura, consistencia etc.
- Encostramiento.
- Apelmazamiento.
- Cambios Texturales.
- Drenaje.
- Aireación.
- Presencia de raíces.
- Deformaciones Radiculares.
- Retención de Agua.

NOTA: Es recomendable hacer un esquema de distribución de propiedades del perfil observado.

Entre las químicas deberían evaluarse:

- Cambios de Color.
- Presencia de materia orgánica.
- Se deben tomar muestras para análisis químico entre 0-20 y 20 y 40 cm de profundidad

Biológicamente deben observarse:

- Presencia de organismos (nematodos, chizas, sinphilidos, colembolos, etc).
- Profundidad de acción de estos.
- Determinación de unidades formadoras de colonias de fusarium.

Es recomendable hacer entre 5 y 8 cajuelas en dirección diagonal a cada área homogénea dentro del lote, para poder evaluar su variación en las direcciones horizontal y vertical.

Si en el lote se presentan varios tipos de suelo es necesario muestrear los independientemente y hacer un mapa o esquema de su distribución.

En cada cajuela se deben tomar muestras para análisis químico entre 0-20 y 20-40 cm. de profundidad y se deben juntar (submuestrear) para hacer una muestra, las de aquellas cajuelas que presentan suelos similares.

Al laboratorio se envían dos muestras debidamente marcadas con los números 0 – 20 y 20 –

40 por cada tipo de suelo. Si el suelo uniforme se envían solo dos muestras.

c) LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO: para la adecuación del lote es necesario conocer sus variaciones topográficas. Para ello, es recomendable hacer un levantamiento topográfico con cotas de 25 cm.

d) DESKIKUYADA Y LIMPIEZA: se presentan dos alternativas:

1) Aplicación de Roundup en dosis de 5cc/L + 1g/L de urea disueltos en 500 Litros de agua para una hectárea. Para una buena aplicación, debe hacerse una correcta demarcación del lote, de tal manera que se puedan hacer aplicaciones en lajas de 1.2m de ancho a lo largo del lote y marcadas con enka. La aplicación debe hacerse con bomba estacionaria o de espalda un mes antes de iniciar la deskikuyada.

2) Hacer sobrepastoreo.

En ambos casos, deben hacerse pases cruzados con rastra o rastrillo e ir sacando los estolones superficiales con la ayuda de rastra de púas.

Para sacar los estolones más profundos, se debe hacer un pase de arado en un solo sentido y dos de rastrillo cruzado y se hace la primera sacada de estolones con rastra de púas y a mano. A continuación se hace un segundo pase arado en sentido contrario del primero y dos de rastrillo cruzado para sacar el resto de estolones y dejar el terreno listo para la aplicación de correctivos y cascarillas.

En ninguna de estas actividades es recomendable usar rotovador, para evitar el deterioro que éste puede causar en la estructura del suelo.

NOTA: Los estolones recogidos deben amontonarse fuera del área planificada para siempre y por ningún motivo quemarse dentro del área que se va a utilizar.

e) NIVELACION GENERAL (RELLENO): Con base en el mapa topográfico es necesario

hacer los rellenos que se crean convenientes. En general, no es recomendable raspar en un sitio para rellenar otro. Cuando sea necesario se debe retirar y acumular la capa superior del suelo con maquinaria pesada. Hacer los raspaditos y rellenos necesarios con el material del subsuelo. Obtenida la nivelación del subsuelo, se procede a aplicar cascarillas en dosis de 50m. cúbicos por 500m²., e incorporarla con arado y cincel a 25cm. o 30 cm. de profundidad. Posteriormente se tiende de nuevo la capa superficial del suelo y se le hacen las condiciones que sean necesarias.

f) DISEÑO Y ELABORACION DE DRENAJES: hecha la nivelación se debe proceder a diseñar y elaborar los canales de drenaje externos e internos que garantizaran el manejo de las aguas sobrante. Los canales externos son fundamentalmente de manejo de aguas de escorrentia, pero son a la vez evacuadores de aguas de drenajes internos cuando los canales internos se conectan a los externos. Todo depende de cómo se maneje la profundidad de los fondos de las zanias.

Los canales de drenaje interno se deben rellenar en el 25% de su profundidad con rajon o cascajo o escoria gruesa y luego con el material de excavación.

Como norma general los canales externos deben tener profundidades entre 70 y 80 cm: los internos principales entre 60 y 70 cm. y los de fondo de cama 40 a 50 cm.

g) CONSTRUCCION DE INVERNADERO: a este estado de secuencia de actividades se deben construir y cubrir los invernaderos.

h) APLICACIÓN DE CORRECTIVOS: Los correctivos químicos a utilizar deben calcularse con base en los análisis de suelos. Las bases intercambiables deben interpretarse a partir de la saturación del elemento dentro de la capacidad de intercambio cationico. Como enmiendas químicas se utilizan normalmente carbonato de calcio, carbonato de magnesio, sulfato de lombriz. Para la interpretación del análisis de suelos, con base en la saturación del elemento, es necesario que cuando se envíen las muestra al laboratorio se indiquen que hagan la determinación de la CIC por el método del Ac-Amonio (1N y pH: 7.0).

Los cálculos de enmienda para calcio, magnesio y potasio deben hacerse para llevar estos a saturaciones de 50%, 20% y 5% respectivamente. El fósforo debe llevarse por lo menos a 80 ppm. Bajo las condiciones de la sábana nunca debe esperarse subir el pH a un valor determinado. Por el poder tampón que presentan estos suelos.

Para facilitar la aplicación de los correctivos, las cantidades aplicar deben pesarse para cada media nave y esparcirse uniformemente al voleo. Cuando la dosis de aplicación es elevada, se divide ésta por el número de cuadros en la media nave y se asigna a cada cuadro la dosis correspondiente. Para las aplicaciones de cal debe preferirse usar cales gruesas 20-100 mallas en suelos livianos y mas finas en suelos pesados y siempre debería contarse con el análisis químico de la cal.

- i) **HUMEDAD DE PREPARACION:** para la preparación el suelo debe estar por debajo del punto adhesivo. **Punto Adhesivo:** contenido de humedad del suelo al cual éste se pega a un cuchillo, navaja o espátula. A este estado de humedad no se debe trabajar el suelo porque se pega a los implementos agrícolas.

Cuando el suelo esté menos húmedo que a punto adhesivo se puede trabajar.

La determinación debe hacerse en el campo a las siguientes profundidades 0 –10, 10 –20, 20 – 30 y 30 –40 cm. No se deben preparar suelos secos.

Si el suelo esta muy seco, es necesario regarlo y llevarlo a un contenido de humedad inferior a punto adhesivo.

- j) **ARADAS:** Se utilizan para aflojar superficialmente el suelo e incorporar los correctivos y la cascarilla y deben hacerse en el sentido de las camas.
- k) **CASCARILLAS:** La cascarilla se adiciona al suelo para mejorar su macroporosidad. Para su aplicación, se recomienda esparcirla sobre el suelo en dos dosis de 20 a 25 cm³ cada una por nave e incorporarla con la secuencia de actividades que se muestra en el esquema. Para el manejo de la cascarilla se debe tener en cuenta las recomendaciones del punto 5F.

- l) **DESTERRONEO:** para fragmentar los terrones grandes se aconseja dar un pase de rastri- llo y en casos muy especiales de rotovator evi- tando los excesos.

- m) **PRIMERA CINCELADA:** La primera cin- celada debe hacerse en dirección a la pendiente, iniciándose dentro de una zania de drenaje. El primer pase debe hacerse a 30 cm de profundi- dad y a 60 cm de separación entre cincele- s (fi- gura 2). Para las cinceladas el tractor debe tra- bajar en la dirección de abajo hacia arriba.

- n) **SEGUNDA CINCELADA:** La segunda cin- celada debe hacerse en la misma dirección de la anterior, pero a 45 cm. de profundidad para ir aflojando mas el suelo e ir incorporando mas profundamente los correctivos y la cascarilla. Este pase debe hacerse en la parte media, del pase anterior. Las cinceladas bien hechas y profundas van a permitir que quienes hacen el doble paleo encuentren un suelo que facilite su labor.

- o) **DRENAJE DE FONDO DE CAMA:** Este tipo de drenaje debería implantarse en todas las camas dedicadas a floricultura, pero es absolu- tamente indispensable en suelos arcillosos. Los drenajes de fondo de cama deben estar conec- tados a los drenajes laterales externos. En otros casos los drenajes de fondo de cama deben ir conectados a los drenajes internos y éstos a los externos.

La profundidad de los drenajes puede variar entre 45 y 55 cm. En suelos completamente planos deben hacerse zanias a 45 cm de pro- fundidad en la parte central y terminar a 50 o 55cm. de profundidad en la parte lateral del bloque para que haya suficiente desnivel para evacuación a los drenajes externos. También se puede drenar a los drenajes internos cuando las condiciones de topografía lo exijan.

El trazado de la zania debe hacerse en el centro de la cama. La zania debe ser del ancho de la palma y llegar a las profundidades descritas anteriormente. El suelo extraído de la excava- ción debe separarse por color o por profundi- dad para evitar mezclas no convenientes. En los primeros 7 a 10cm. del fondo debe ponerse cascajo o piedra y cascarilla y escoria para que la zania tenga capacidad de drenaje. Los mate- riales adicionados al fondo pueden cubrirse con un plástico perforado y de menor espesor que el ancho de la zania. Una vez hecho lo an-

terior, se procede a llenar de nuevo la zania con el suelo excavado.

Otras alternativas para el drenaje de fondo de cama son las que utilizan tubo de gres perforado, manguera negra de 3 a 4" perforada, manguera de drenaje, rajon, piedra acomodada etc. El concepto en este sentido es el de que el fondo de la zania debe quedar ocupado con un material que permita el flujo rápido del agua sobrante.

- p) **DOBLE PALEO:** El doble paleo es la operación mas importante en la preparación de los suelos en floricultura. Todas las operaciones anteriores a ésta han tenido como fin aflojar el suelo hasta 40 o 50 cm de profundidad para que los operarios puedan hacer un buen doble paleo.

La labor básicamente consiste en terminar de aflojar el suelo y en conseguir una buena mezcla con la cascarilla hasta una profundidad de 40 cm a 50 cm.

El supervisor y el agrónomo deben evaluar permanentemente esta labor con la ayuda de varillas, palas o barreno, para corregir si es del caso a quien contrata la doble paleada. La única forma de lograr un suelo uniforme en las direcciones horizontales y verticales es mediante un buen doble paleo, el cual debe hacerse a conciencia. La mejor forma de preparar camas para floricultura es mediante un buen doble paleo.

- q) **NIVELACION DE LA NAVE:** Hecho el doble es necesario nivelar la nave con gancho o pala. Si se hace con maquinaria pesada se pierde el efecto de la doble paleada.
- r) **INSTALACION DE LAS REDES DE RIEGO Y FUMIGACION:** En este estado de avance debe contarse con las redes de riego y fumigación. En los hidrantes debe garantizarse buena evacuación de aguas.
- s) **FERTILIZACION SOLIDA:** la fertilización debe recomendarse con base en el análisis del suelo, pero teniendo en cuenta que el volumen de suelo útil por unidad de volumen, ha sido disminuido por las adiciones de cascarilla. Los fertilizantes sólidos deben incorporarse entre 0 y 20cm. de profundidad y se constituyen en la base nutritiva fundamental para el buen arranque del cultivo. Las pesadas de los fertilizantes

debe hacerse por medias naves y aplicarse individualmente no mezclados. Cuando las cantidades a aplicar son pocas, inferiores a 2KG. se debe mezclar esta cantidad con 5Kg. de suelo seco y esparcirse al voleo. Los elementos menores se pueden aplicar con fumigadora para asegurar su uniformidad.

Nota: Los fertilizantes a aplicar deben estar sin terroneos, es decir, en su estado original de presentación.

- t) **INCORPORACION DE FERTILIZANTES:** De preferencia los fertilizantes deben incorporarse a mano con gancho, también se puede hacer esta labor con motoazada pero evitando hacer compactaciones aun cuando sean ligeras.
- u) **LEVANTAMIENTO DE CAMAS:** Es la ultima etapa de la preparación de suelos. Se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:
- Humedad del suelo: inferior al punto adhesivo.
 - Trazado:
 - (a) Iniciallo en la orilla del invernadero, dejando un camino en la primera cama y teniendo la prevención de que nunca quede un limaton en el centro del camino.
 - (b) Las camas de cada media nave deben quedar enfrentadas con sus correspondientes de la otra media nave.
 - (c) Los dos extremos de las camas deben quedar perfectamente alineados
 - (d) Para el marcado de las camas deben usarse preferiblemente estacones gruesos de 70cm. de largo, para evitar cuando se riegue se causen daños a las plantas recién sembradas.
 - Levantar y trabajar las camas solo utilizando los caminos.
 - En general, las camas deben levantarse a 30 cm. para contar con buena aireación, drenaje y temperatura.
- v) **EMPAREJADA Y PULLIDA DE CAMAS:** Después de la levantada debe nivelarse la cama con rastrillo y tabla y eliminarse a mano los terrones grandes que puedan obstruir posteriormente el crecimiento de las raíces o el movimiento del agua.

- w) **RIEGO:** Concluida la elaboración de las camas, se procede a hacer un riego pesado con varios pases de poma evitando dañar la cama. Para llevar por lo menos los primeros 10cm. a capacidad de campo. Llevar el suelo a capacidad de campo en este momento garantiza buen mojamiento del suelo y facilita hacer un riego eficiente en el futuro. A capacidad de campo hay buena aireación, por lo tanto, no deben presentarse problemas de pudriciones radiculares. El riego debe hacerse 2 días antes de la siembra. Si es necesario aplicar herbicida pre-emergente, el riego debe hacerse 7 días antes de la siembra.
- x) **MARCADA:** Con los implementos diseñados para marcar las distancias de siembra, se marcan los sitios para facilitar esta labor.
- y) **SIEMBRA:** colocación y siembra de las plantulas a las densidades y distancias recomendables.
- z) **REFRESCAMIENTO:** riego de bajo caudal y alta frecuencia para evitar la deshidratación de las plantulas recién sembradas. Debe hacerse con poma o microaspersión., evitando encharcamientos o saturación de suelos.

SECUENCIA DE LAS ACTIVIDADES EN SUELOS MEDIOS Y LIVIANOS

La secuencia de actividades en estos dos tipos de suelos, se presentan en las figuras 2 y 3. La descripción de ellas es similar en su mayoría a las descritas para suelos arcillosos.

En producción continua de flores el uso permanente de suelos y de enmiendas físicas conducirá a los suelos a adquirir cada vez mas firmemente características de suelos livianos aun habiéndose partido de suelos pesados.

En este sentido es bueno aclarar, que no es que el suelo cambie de textura, lo cual es prácticamente imposible, sino que a medida que se usa y enmienda, físicamente va cambiando permanentemente sus relaciones de porosidad y va originándose una nueva estructura funcional productiva dada por una nueva distribución de tamaño de poros, muy diferente a la estructura genética.

Entonces un suelo que originalmente ha sido arcilloso o franco empieza a comportarse en sus relaciones agua-aire como suelo arenoso. Este tipo de cambio es provechoso para la producción y para la sostenibilidad de suelos y de cultivos.

Químicamente también se producen cambios significativos positivos o negativos, según el tipo de manejo que se de a la aplicación de correctivos y fertilizantes. Un manejo adecuado de estos conduce a la obtención de un suelo fértil, capaz de satisfacer los requerimientos nutritivos de los cultivos de flores: mientras que un manejo inadecuado llega a originar graves problemas de degradación por salinidad y por balances nutricionales.

Obsérvese en los esquemas, que como consecuencia de la utilización de los principios que acaban de describirse, la intensidad de manipulación del suelo va disminuyendo drásticamente en función de tiempo de uso hasta llegar a hacer sólo un doble paleo o paleo medio en suelos ligeros, con buen drenaje como ocurre en el pompon.

Las actividades que hay que realizar que no se presenta para suelos arcillosos se describen a continuación.

UBICACION DE PUNTOS CRITICOS: Se entiende como punto crítico dentro del contexto de manejo de suelos en flores, a aquellas áreas que por poseer un factor limitante para los cultivos, (susceptibilidad a encharcamiento, parches salinos, capas compactadas, colchones de cascarilla, muy baja capacidad de retención de agua, baja fertilidad, presencia de focos fitosanitarios etc.) no es tan productiva como las circundantes.

CORRECCION DE PUNTOS CRITICOS: Una vez ubicadas las áreas críticas y determinando él o los factores limitantes es necesario diseñar las prácticas para su mejoramiento y ejecutarlas, Ej.: Nivelar, drenar, lavar, rellenar, depresiones, incorporar nuevas enmiendas físicas y químicas, etc.

DESINFECCION: muchas áreas que han venido siendo utilizadas en flores pueden tener problemas de contaminación por enfermedades, plagas etc. Esto también puede ocurrir en suelos nuevos. Para la desinfección de suelos se propone el esquema 4, el cual contempla que la aplicación debe hacerse después del doble paleo y habiendo llevado el suelo a capacidad de campo. **CAPACIDAD DE CAMPO:** contenido de humedad del suelo después de haber sido mojado abundantemente hasta

40 cm. de profundidad y dejado drenar por 24 a 48 horas.

Cuando el suelo está a capacidad de campo los mesoporos están llenos de agua, pero los macroporos están llenos de aire, por lo tanto cualquier producto que se aplique va a circular por los macroporos y a difundirse por los mesoporos, pudiendo controlar los organismos patógenos que se encuentran en el suelo, (ver anexo sobre desinfección).

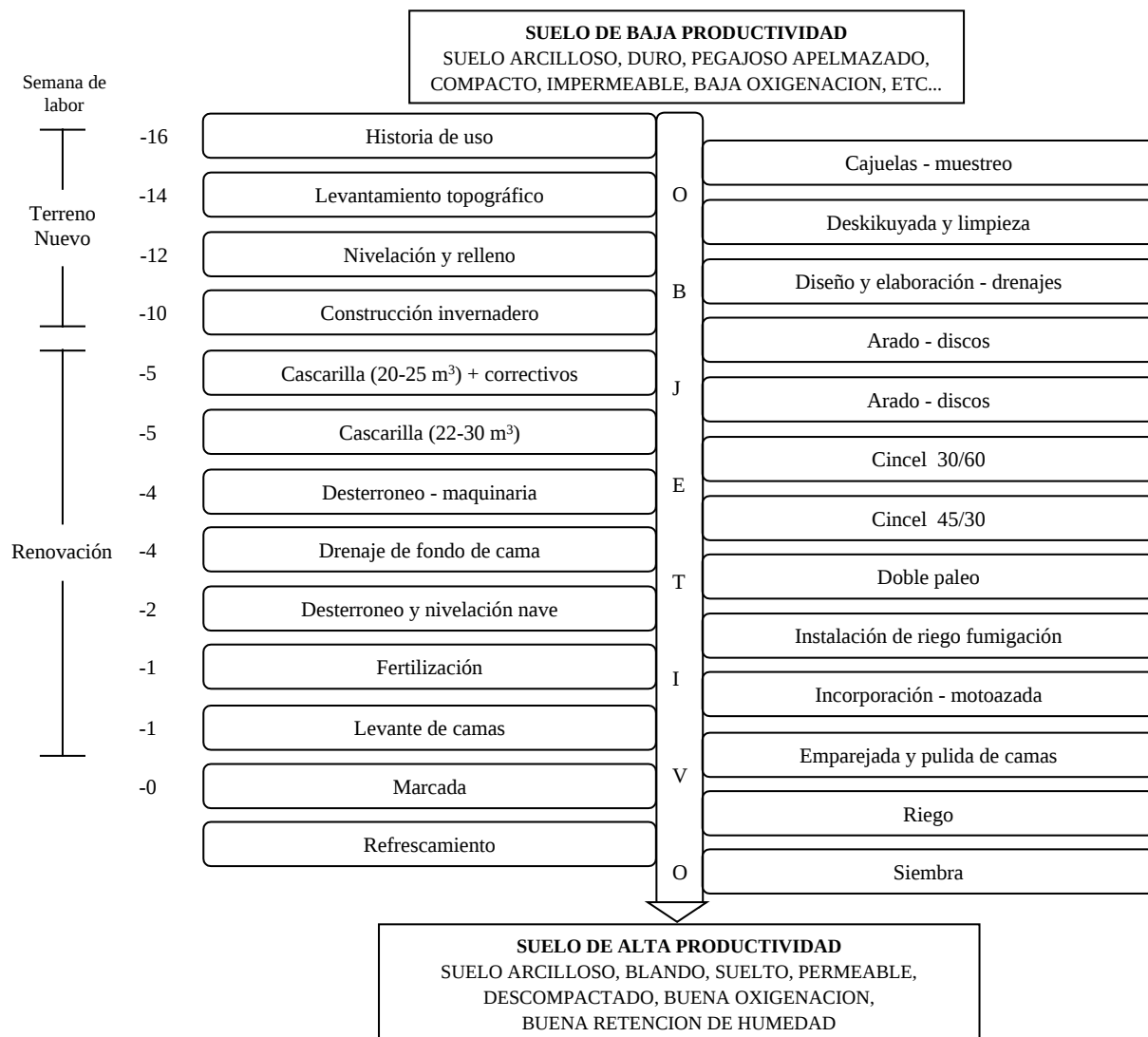
DETERMINACION DE CAPACIDAD DE CAMPO: Para cada condición de suelo (pesado,

medio o ligero) y de cantidad de mezcla física, ubique por lo menos 5 naves a través de un bloque uniforme y en cada una, una cama al azar, en ella señale un área de 1.5 mts², ponga dos sacos de fique o ponga mulch para evitar que al adicionar agua haya dispersión del suelo. Sobre esta superficie haga un riego pesado equivalente a 150 L/m². Deje drenar por 24 a 48 horas y tome muestras para determinar el porcentaje expresado en términos de humedad y la densidad aparente. El valor obtenido expresado en términos de humedad volumétrica es la capacidad de campo.

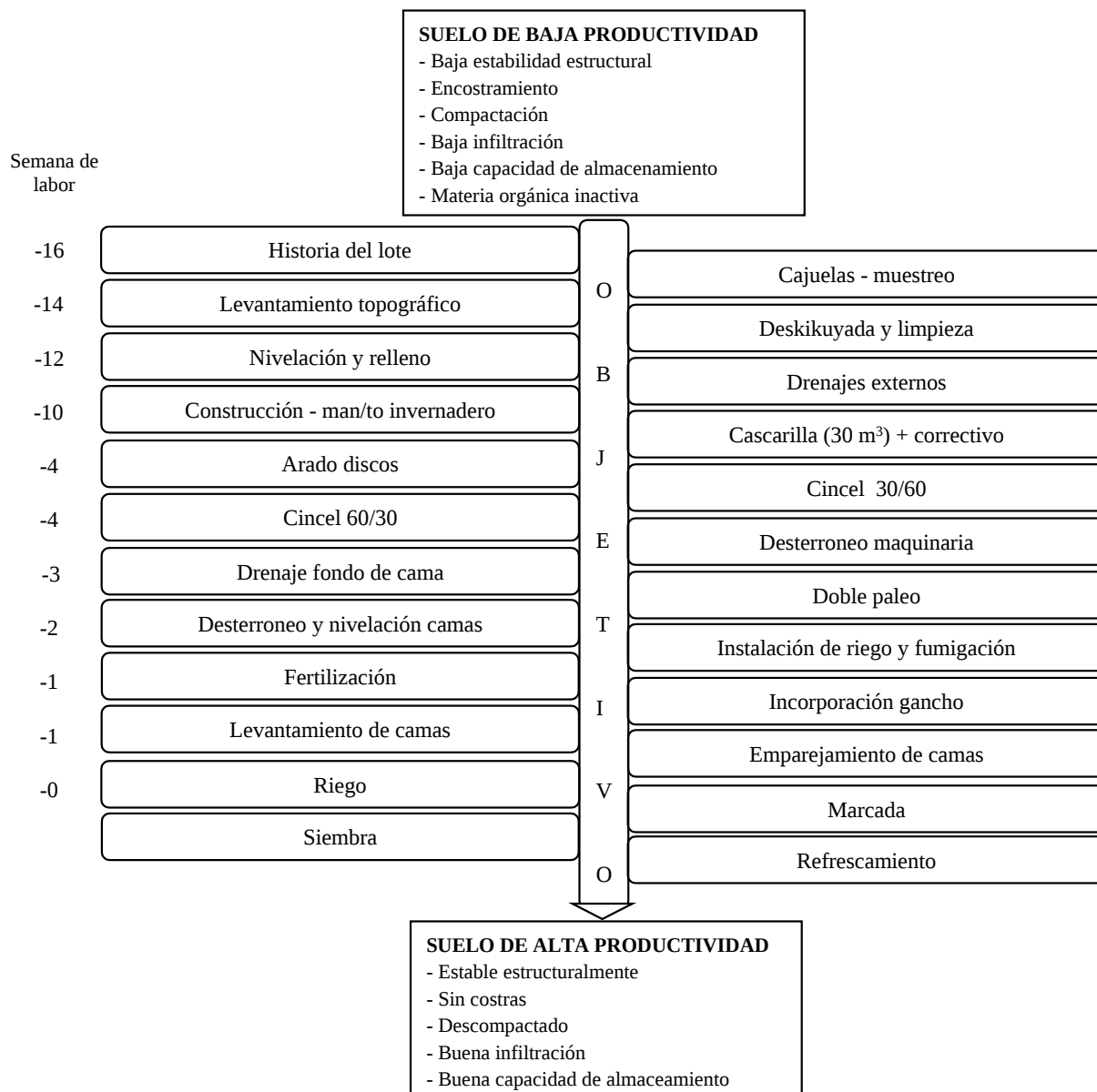
Dimensión y altura de las camas en algunos cultivos de flores

	Clavel y Miniclavel (m)	Cypsophila Cama Ancha	Cama Angosta	Pompon	Rosa	Statice	Cala
Ancho	0.9	12	0.9	12	13	12	0.9
Largo	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4
Caminos	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura Suelos							
S. Pesados	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3
S. Medios	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
S. livianos	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
Camas/Nave	10.0	8.0	10.0	8.0	8.0	8.0	10.0
Camino Central	18	20	20	20	18	18	18
Ante pecho a cama	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Dimensiones invernadero	6.8 x 66.30	6.8 x 66.30	6.8 x 66.30	6.8 x 66.30	6.8 x 66.30	6.8 x 66.30	6.8 x 66.30

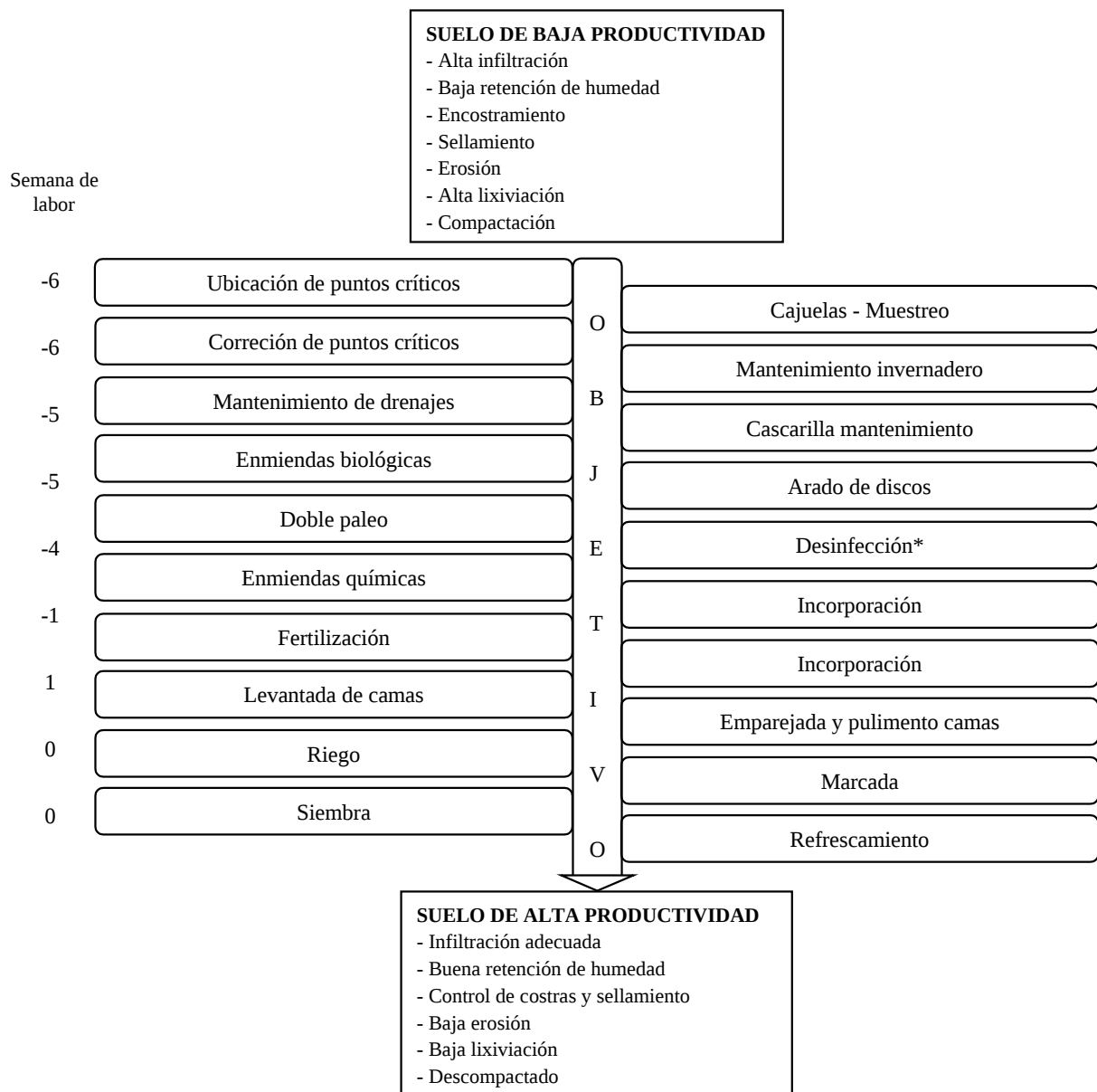
Secuencia esquemática de actividades en la adecuación de suelos pesados para flores



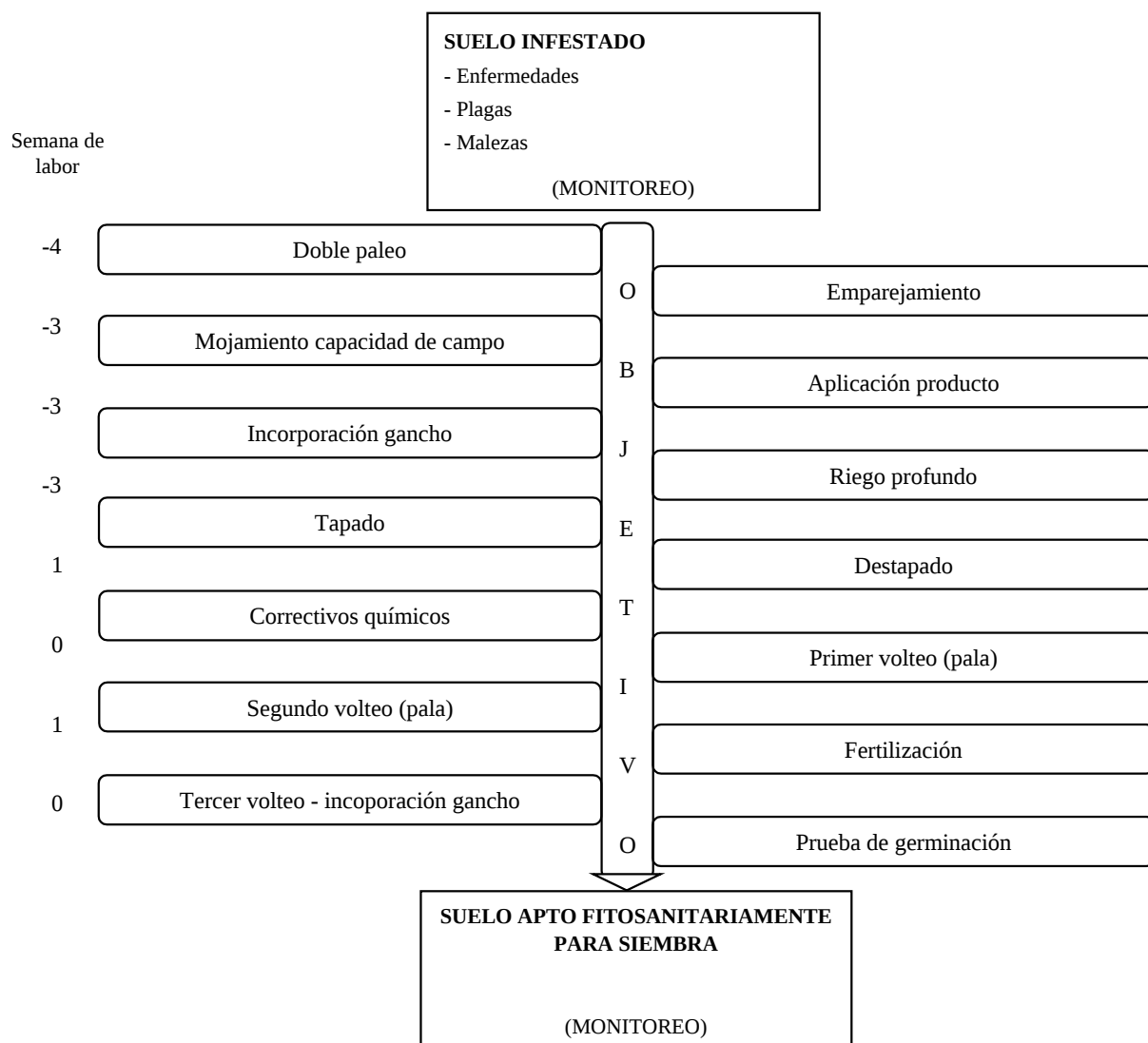
Secuencia esquemática de actividades en la adecuación de suelos medios para flores



Secuencia esquemática de actividades en la adecuación de suelos livianos para flores



Desinfección



PREPARACION DE SOLUCIONES NUTRITIVAS PARA FERTILIZACION

Soraya Alvarado*

INTRODUCCION

Fertilizante líquido es en general cualquier solución, suspensión o gas licuado que contenga uno o más nutrientes esenciales y que pueda ser empleado para tal fin (6). Esta definición también engloba a los fertilizantes foliares, que por presentar características propias en cuanto al proceso de producción, concentración de nutrientes y modo de utilización, forman otra familia de fertilizantes.

En forma específica, un fertilizante líquido es todo material fertilizante que pueda ser manipulado, almacenado, transportado y aplicado al suelo en forma líquida (4).

Los fertilizantes líquidos ofrecen ventajas relativas frente a los fertilizantes sólidos, fundamentalmente en el manejo, almacenamiento, flexibilidad para preparar mezclas con diferente composición, uniformidad de aplicación, facilidad de aplicación al suelo y menores costos (4).

Teniendo en cuenta la forma como se encuentran los nutrientes dispersos en el medio, los fertilizantes líquidos se clasifican en soluciones y suspensiones.

SOLUCIONES

Los fertilizantes líquidos en forma de solución tienen los solutos totalmente disueltos en solvente (agua) constituyendo una sola fase. Son dispersiones moleculares e incluso atómicas, con diámetros de partículas inferiores a 10^{-7} cm. Pueden almacenarse largos períodos, pero se debe tener cuidado con las soluciones de concentraciones elevadas, en las cuales puede ocurrir cristalización, incluso a temperatura ambiente (6).

Normalmente las soluciones son fertilizantes simples, es decir contienen apenas un nutriente. Las más comunes son las soluciones nitrogenadas, pero pueden existir soluciones de nitrógeno (N) y fósforo (P) o N, P y potasio (K). En general, el problema de las soluciones es la baja concentración en nutrientes, debido a la solubilidad de las materias primas utilizadas (4).

SUSPENSIONES

Las suspensiones son fertilizantes líquidos que tienen nutrientes sólidos dispersos en la matriz (agua), con partículas de diámetro mayor a 10^{-5} cm en las dispersiones gruesas y 10^{-6} - 10^{-7} cm en las dispersiones coloidales. Las suspensiones presentan dos fases, una sólida y otra líquida que en reposo son susceptibles de separarse. Para obtener un producto homogéneo los fabricantes adicionan un agente estabilizador que generalmente son arcillas como la atapulgita, sepiolita o bentonita. Se puede también recurrir a procesos mecánicos como agitación e insuflación de aire comprimido. La concentración de nutrientes en las suspensiones está limitada por la viscosidad y la fluidez del producto final (6). Las partículas en suspensión deben ser tan pequeñas como sea posible para evitar la obstrucción de las boquillas de riego de baja frecuencia (orificios con diámetros que oscilan entre 1-3 mm), y con viscosidades que no excedan los 500 centipoise, garantizando así su manipulación.

Las suspensiones son más concentradas respecto a las soluciones y por supuesto más económicas. Existen muchos tipos de suspensiones, entre las más comunes están las suspensiones individuales de N, P, K, azufre (S) elemental, calcio (Ca), y suspensiones compuestas de NPK (2). Estas suspensiones pueden contener también cantidades pequeñas de microelementos como boro (B), hierro (Fe), cobre (Cu), entre otros (9).

FUENTES DE NUTRIENTES PARA FERTIGACION

Existen numerosos fertilizantes en el mercado que pueden ser utilizados en fertigación, como los presentados en la tabla 1. Su elección depende de las características propias del producto y de la interacción de los factores suelo, agua, planta y sistema de riego (14). Las fuentes más comunes de nutrientes se discuten a continuación.

Fertilizantes Sólidos

Los fertilizantes nitrogenados comunes en el mercado, como la urea, nitrato de amonio, sulfato de

* Departamento de suelos, Estación Experimental Santa Catalina, INIAP.

amonio, son los más solubles en agua y no presentan problemas para ser utilizados en fertilización.

Los fertilizantes potásicos presentan menor solubilidad que los nitrogenados, sin embargo, son muy utilizados en fertilización el nitrato y el cloruro de potasio.

Los fertilizantes ricos en P son los más problemáticos para usarse en fertilización por la baja solubilidad en agua de la mayoría de ellos y por el riesgo de precipitación de los fosfatos solubles (MAP o DAP) o el ácido fosfórico en presencia de Ca.

Los principales fertilizantes sólidos que pueden ser utilizados como fuente de nutrientes en fertilización se describen a continuación:

Sulfato de amonio ($\text{SO}_4[\text{NH}_4]_2$): Contiene N amoniacal (21%) y S (23%). El contenido de sulfatos puede presentar problemas de salinidad. Su reacción es acidificante, por lo que es recomendable para suelos alcalinos.

Nitrato de calcio ($\text{Ca}[\text{NO}_3]_2$): Tiene aproximadamente 15 - 16 % de N en forma nítrica. Se utiliza en fertilización como portador de Ca. Es el más hidroscópico de los fertilizantes.

Nitrato de amonio (NO_3NH_4):- Contiene 33,5 - 34 % de N pero forma soluciones saturadas que contienen prácticamente los mismos valores de N que la urea. Es un fuerte agente oxidante que tiende a provocar explosiones en presencia de materia orgánica. Su disolución es endotérmica y acidifica el medio. El aporte de N en forma nítrica y amoniacal lo hace uno de los materiales más apropiados en fertilización.

Urea (NH_2CONH_2): Es un compuesto de alto contenido de N (46%) más móvil que las sales amoniacales por ser menos absorbida por el suelo ya que es una molécula neutra. Sin embargo, se hidroliza rápidamente y cambia a amonio y finalmente a nitrato. También acidifica el suelo. Su gran solubilidad y falta de retención por el suelo puede provocar pérdidas importantes si no se controlan las condiciones de aplicación.

Nitrato de potasio (KNO_3): Es excelente portador tanto de N (13 %) así como de K (44 - 46 % K_2O) por lo que se lo utiliza ampliamente en fertilización. Sin embargo, la máxima concentración a obtenerse es alrededor de 6% K_2O en solución.

Sulfato de potasio (K_2SO_4): Es más salino que el nitrato de potasio por la presencia del sulfato en su composición. Contiene 50 % de K_2O y 17 % de S.

Cloruro de potasio (KCl): Contiene 62 % de K_2O y 47 % de Cl. Es la principal fuente de K en fertilización por su bajo costo y gran solubilidad. Las soluciones de KCl alcanzan un máximo 12 % de K_2O .

Fosfato monoamónico, MAP ($(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$): Tiene 12 % de N y 60 a 62 % de P_2O_5 . Posee poco efecto salinizante y reacción ácida por lo que disminuye el riesgo de obturaciones de los sistemas de riego. Por su composición es uno de los materiales más usados en fertilización.

Fosfato diamónico, DAP ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$): Tiene reacción alcalina, 21 % de N y 52 a 54% de P_2O_5 . Se recomienda utilizarlo junto con un ácido, generalmente ácido nítrico (1.3 kg de ácido por 1 kg de fosfato diamónico).

Microelementos: Estos nutrientes pueden aportarse a través de dos fuentes principales:

1 Sales minerales inorgánicas:

- Fe (Sulfato ferroso)
- Mn (Cloruro o sulfato de manganeso)
- Zn (Sulfato de zinc)
- Cu (Sulfato de cobre)
- Mo (Molibdato de amonio)
- B (Tetraborato de sodio, ácido bórico) (1).

2 Productos orgánicos o quelatos: En estos compuestos cada ion metálico está retenido por la estructura del agente quelante, a través de enlaces coordinados. Estas estructuras evitan la eventual reacción química con otros iones en la solución de fertilización. Se aplican en pequeñas cantidades y frecuentemente son más efectivos que los compuestos inorgánicos, sobre todo en suelos ácidos y en suelos ricos en materia orgánica. Los agentes quelantes más utilizados son los derivados del ácido acético, tripolifosfato y ácidos hidroxicarboxílicos como DTPA, EDTA, HEDTA, etc.

Fertilizantes líquidos

Soluciones

Amoniaco anhidro: Contiene el 82 % de N. Es un fertilizante de uso peligroso, que además presenta problemas de precipitación y pérdidas por volatilización. La mejor forma para aplicar fertilizantes que contengan amoniaco libre es la acidificación del agua de riego, previa la inyección del fertilizante (11).

Solución nitrogenada al 20%: Es una de las más populares soluciones acuosas de N. Se utiliza con frecuencia en suelos de pH básico.

Solución nitrogenada al 32%: Constituye la solución de más alta concentración de N obtenida en la práctica. Se prepara con una mezcla de nitrato de amonio y urea al 50 %. Es una solución poco salinizante de reacción neutra. La combinación de las tres formas de N en la solución presenta ventajas en diferentes tipos de fertigación y en determinados suelos. En el comercio brasileño se conoce como URAN y en los EE.UU como UAN.

Nitrato de calcio líquido: Utilizado frecuentemente para aportar Ca, contiene 10 % de dicho elemento y 7 % de N.

Nitrato de magnesio líquido: Con un contenido del 6 % de magnesio (Mg) y 7 % de N nítrico, es usado para cubrir deficiencias de Mg.

Acido fosfórico (H_3PO_4): Es usado cada vez más en riego localizado como portador de P. La riqueza en P_2O_5 oscila entre el 40 y 54 %. Con mayor grado de salinidad que el fosfato monoamónico, es fuertemente acidificante. Es también utilizado para la limpieza de tuberías o sistemas de riego.

Complejos líquidos.- Contienen dos o tres de los elementos nutritivos principales. Pueden utilizarse directamente incorporándose al agua de riego. Están constituidos por urea, fosfato monoamónico, fosfato diamónico.

Suspensiones

Suspensiones coloidales: Están constituidas por fosfato de amonio líquido (por ejemplo $NH_4H_2PO_4$) obtenidas a través de la reacción de amoniaco anhidro o hidróxido de amonio con el ácido fosfórico. De modo general poseen una consistencia espesa y una viscosidad relativamente alta. Estas suspensiones pueden ser enriquecidas con adición de N o K (14).

Mezclas en suspensión: Obtenidas a partir de la mezcla de fertilizantes líquidos simples (32-00-00, 10-30-00, 6-30-00) con cloruro de potasio. Una pequeña parte del K permanece en solución, mientras la mayor parte se halla en suspensión, a través de la adición de atalugita o bentonita (14).

CONSIDERACIONES BASICAS SOBRE EL USO DE LOS FERTILIZANTES EN FERTIGACION

Las principales características que deben ser observadas al decidir que fertilizante se debe utilizar en fertigación son las siguientes (14):

- Solubilidad rápida y completa.
- Baja capacidad corrosiva
- Compatibilidad con otros fertilizantes y con el agua de riego
- Baja toxicidad
- Baja volatilidad
- Pureza
- Precio

SOLUBILIDAD

En general, la disolución de un compuesto depende de la interacción entre las partículas del soluto y las del solvente. Si estas dos fases juntas forman un sistema más estable que las fases del soluto y del solvente puras, entonces se considera que existe disolución (8).

El proceso de disolución de una sal en agua implica básicamente la separación de iones del retículo cristalino sólido de la sal hacia el medio de la solución acuosa. La estructura reticular organizada del sólido cristalino representa un estado de equilibrio con una energía relativamente baja. La separación de iones de esta estructura implica consumo de energía. Por otra parte, se desprende energía cuando se solvatan los iones separados del sólido. Estas energías reciben el nombre de energía reticular y energía de hidratación. Por tanto, el grado en que un sólido es soluble en medio acuoso depende de la diferencia entre estas dos energías.

En el caso de muchos electrolitos (sales), la energía reticular es ligeramente mayor que la energía de hidratación, de modo que la solubilización de estos electrolitos es un proceso que requiere cierta cantidad de energía por encima de la energía de hidratación. En consecuencia, la disolución de estos electrolitos es mayor conforme se eleva la temperatura.

Los compuestos iónicos se disuelven en el medio (agua) hasta llegar a un punto en el cual se satura la solución y no se puede disolver más sólido. La cantidad de soluto necesaria para saturar una solución se conoce como “punto de solubilidad” de la sustancia y se expresa en g/100 ml de agua a 20 ó 25 ° C. Una solución saturada está en equilibrio con el sólido presente. Si se añade un más soluto a una solución saturada, este se separa y precipita. Sin embargo, diversos fenómenos como el aumento de temperatura, logran disolver más soluto en una solución saturada, obteniéndose las llamadas soluciones sobresaturadas, cuyo equilibrio metaestable se rompe por la presencia de un cristal de soluto que sirve de semilla para la recristalización y precipitación (16).

El resultado de la mezcla de sales tiene una solubilidad más elevada que el total de las sales individuales. Por ejemplo, la solubilidad de la urea es de 67 g/100 ml de agua a 0 °C y la del nitrato de amonio es de 118 g/100 ml. Sin embargo, a la misma temperatura una mezcla de urea y nitrato de amonio al 50 %, tiene una solubilidad de 390 g/100 ml de agua. Similares resultados se obtienen con el MAP y el DAP (2).

Como regla general, los nitratos y cloruros tienen solubilidades mayores que los sulfatos, estos últimos a su vez más altas que los óxidos, carbonatos o bicarbonatos.

Factores que afectan la solubilidad

Temperatura

La solubilidad, como se ha mencionado antes, varía con la temperatura. Esta variación está asociada con la energía liberada o absorbida cuando un mol de soluto se disuelve en el solvente. Si el proceso de disolución es endotérmico (absorbe energía) la solubilidad aumenta a medida que aumenta la temperatura. Por ejemplo en una disolución de nitrato de amonio al 50 %, de 26 ° C iniciales se llega a -3 ° C. Si el proceso de disolución es exotérmico (libera energía) la solubilidad disminuye a medida que aumenta la temperatura, es el caso del ácido fosfórico que al ser diluido en agua al 50 % provoca una elevación de temperatura de 24 a 34,3 ° C (10).

Es necesario entonces conocer la solubilidad con su respectiva temperatura, pues sólo así estaremos seguros de no provocar cristalización. En la Tabla 1 se ilustran estos parámetros para alguno fertilizantes utilizados en fertigación.

Efecto del pH.

Los compuestos más afectados por el pH, en cuanto a solubilidad, son los fosfatos ya que la forma del anión fosfato cambia con el pH. A pH 4.7 predomina el fosfato diácido (H_2PO_4^-), en tanto que a pH 9.7 el fosfato monoácido (HPO_4^{2-}).

Tabla 1. Solubilidades de fuentes fertilizantes a diferentes temperaturas (1).

Material	Temperatura												
	°F	32	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
	°C	0	1.7	4.4	7.2	10.0	12.8	15.6	18.3	21.1	23.9	26.7	29.4
	Solubilidad (g/100 ml)												
Nitrato de potasio	13	14	16	19	21	24	27	30	33	37	40	45	
Urea	67	69	74	79	84	89	95	106	107	115	123	131	
Nitrato de amonio	118	124	135	147	158	168	178	188	199	219	225	239	
Sulfato de amonio	70	71		73				74				77	
Solución de N (32-0-0)	390	455	563	672	781	890	998	1104	1216	1324	1433	1542	
Cloruro de amonio	29				33				38			41	
MAP	22	23	25	27	29	31	33	36	38	40	43	45	
DAP	42	46	51	57	62	64	66	67	69	71	73	74	
Cloruro de potasio	28	28	29	30	31	31	32	33	34	35	36	36	
Sulfato de potasio	7				9		11					12	
Fosfato monopotásico	14		15		17		20		22	24	25	27	
Fosfato dipotásico	132				148		151		160	167	172	178	

Entre estos dos valores de pH se producen mezclas de las dos formas aniónicas en diferentes propor-

ciones. Así, dependiendo del pH se tendrán por ejemplo formas distintas de fosfatos de potasio y

amonio, con solubilidades diferentes. De esta forma, la solubilidad del $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (DAP) es de 68.6 g/100 ml agua a 20 °C, mientras que la solubilidad del $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ (MAP) se reduce a 36.8 a la misma temperatura (8).

La solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio se reduce con el aumento del pH del agua. Esta condición permite la precipitación de los carbonatos (14).

En el caso de sales poco solubles como el sulfato de calcio, un incremento de iones H^+ , debido a la adición de un ácido que no tiene un anión en común con la sal (ácido nítrico, por ejemplo) permite un incremento en la solubilidad.

Producto de solubilidad

En una solución acuosa saturada de una sal poco soluble (es decir aquellas cuya solubilidad es menor que 0.01 moles por litro) el producto de las concentraciones totales de los iones originados por dicha sal es constante a una determinada temperatura. Esta constante recibe el nombre de producto de solubilidad (Kps). Cuanto más grande es el valor del Kps más soluble será la sustancia (15).

En general, una sustancia poco soluble (A_mB_n), se disocia en solución (forma aniones y cationes) según la ecuación siguiente:



Esta sustancia tendrá un producto de solubilidad definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Kps} = [\text{A}^{n-}]^m \times [\text{B}^{m+}]^n$$

El producto de solubilidad está rígido por el equilibrio que se establece en una disolución saturada. Si este equilibrio se rompe por disminución de las concentraciones iónicas de la parte disuelta, se podrá disolver más sólido hasta recuperar el equilibrio. Si aumentan dichas concentraciones iónicas, la parte disuelta se precipitará hasta alcanzar nuevamente el citado equilibrio. En otras palabras, para que una sustancia precipite es necesario que el producto de las concentraciones de los iones formados en su disociación iónica, elevadas a sus respectivos coeficientes, sea mayor que su producto de solubilidad (5).

La concentración de la parte disuelta de la sal mide la solubilidad (S) en solución acuosa saturada. De esta manera, para la sal A_mB_n la solubilidad será igual:

$$S = [\text{A}_m\text{B}_n] = \frac{[\text{A}^{n-}]}{m} = \frac{[\text{B}^{m+}]}{n}$$

Al relacionar con el producto de solubilidad se tiene:

$$S = (\text{Kps} / m^m \cdot n^n)^{1/(m+n)}$$

Con estas ecuaciones se puede encontrar la solubilidad, conociendo el producto de solubilidad o viceversa.

Existen, sin embargo, limitaciones del principio del producto de solubilidad. Una de éstas es el efecto del ión diverso ó llamado efecto salino. Esto se refiere a que muchas sales poco solubles muestran un aumento de su solubilidad en presencia de concentraciones crecientes de otras sales que no posean un ion en común con la sal en mención. Normalmente este aumento es mayor conforme aumenta la valencia de los iones de las sales añadidas.

El efecto salino se explica por el hecho de que cuando hay una concentración significativa de iones diversos, se observa una mayor fuerza iónica de la solución (efecto de atracción interiónica), con una consecuente disminución en los coeficientes de actividad de los iones de la sal escasamente soluble. En consecuencia, la solubilidad debe aumentar para que el producto de actividad permanezca constante.

Para ilustrar el efecto del pH, así como la importancia del conocimiento del Kps de una sal, se presenta el siguiente ejemplo: al preparar una solución de sulfato de zinc, es factible considerar la formación en el seno de la solución del hidróxido de zinc $[\text{Zn}(\text{OH})_2]$ que es insoluble. El Kps del $\text{Zn}(\text{OH})_2$ es 1.8×10^{-14} .

Con una concentración de Zn de 10 ppm a pH 2,95 el producto de las concentraciones de los iones elevadas a sus respectivos coeficientes responde a :

$$\text{A pH } 2.95; [\text{Zn}^{2+}] \times [\text{OH}^-]^2 = 1.24 \times 10^{-26} < \text{Kps. No se precipita el Zn como Zn}(\text{OH})_2.$$

$$\text{A pH } 7.47; [\text{Zn}^{2+}] \times [\text{OH}^-]^2 = 5.18 \times 10^{-18} < \text{Kps. No se precipita el Zn como Zn}(\text{OH})_2.$$

$$\text{A pH } 9.2; [\text{Zn}^{2+}] \times [\text{OH}^-]^2 = 3.92 \times 10^{-14} > \text{Kps. Se precipita el Zn como Zn}(\text{OH})_2 \text{ con la consiguiente pérdida de Zn en forma iónica de la solución.}$$

INCOMPATIBILIDAD DE LOS FERTILIZANTES EN SOLUCION

Para la preparación de la solución madre es necesario conocer la compatibilidad de los fertilizantes a utilizarse (Tabla 2), para no provocar reacciones químicas que al final arrojen resultados diferentes y afecten la solución nutritiva.

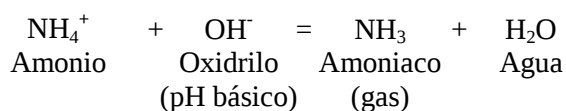
La incompatibilidad más importante, se produce cuando la mezcla de fertilizantes origina precipitados en la solución. Se debe considerar también la incompatibilidad de tipo térmico que ocurre cuando la mezcla genera calor e incluso reacciones violentas. Entre éstas últimas se encuentra la mezcla de cloruro de zinc con soluciones nitrogenadas, ó el amoniaco anhidro con cualquier tipo de ácido fuerte.

Se puede adicionar alrededor de 2 % de uno o más micronutrientes a la solución nutritiva. En suspensiones, ese índice se extiende al 10 %. Como precaución se recomienda respetar las recomendaciones dadas por los fabricantes, en caso de duda se debe efectuar previamente una mezcla para validar la compatibilidad entre los productos. Cualquier alteración física de la mezcla significa "a priori", una incompatibilidad (14).

Por supuesto, se debe considerar también la compatibilidad de los fertilizantes con la propia agua de irrigación y que mayor es la posibilidad de incompatibilidad cuando mayor es la concentración de las soluciones. El potencial de incompatibilidad es menor en soluciones diluidas ya que todo compuesto, aún los llamados insolubles, tiene posibilidad de disolverse en pequeña cantidad por el efecto del ión diverso ó efecto salino antes mencionado (8).

Pérdidas de nutrientes

Los fertilizantes nitrogenados amoniacales pueden perder N por volatilización cuando son añadidos en un medio de pH básico ya que se produce la siguiente reacción:



El amoniaco (NH_3) es un gas susceptible de perderse por volatilización con el aumento de temperatura. En consecuencia, las sales de amonio no deben mezclarse con sustancias que producen pH básico (8).

Tabla 2. Relaciones de compatibilidad e incompatibilidad entre diferentes fuentes fertilizantes usadas en fertigación (Ortega et al., 1997).

Fuentes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	v														
2		v													
3			v	I	R	R	R								
4			I	v			I	I	I		I	I	I	I	
5			R		v		R		R		I	R		R	
6			R			v	R		R			R		R	
7			R	I	R	R	v		R			R		R	
8				I				v	I	R		I			
9				I					v			R	I	R	I
10										v					I
11	R			I							v				
12				I	R	R	R	I				v			
13				I			R		I	R			v		
14				I						R				v	
15										I					v

1 = Urea, 2 = Nitrato de amonio, 3 = Sulfato de amonio, 4 = Nitrato cálcico, 5 = Nitrato de potasio, 6 = Cloruro de potasio, 7 = Sulfato de potasio, 8 = Fosfato de amonio, 9 = Sulfatos de Fe, Zn, Cu, Mn, 10 = Quelatos de Fe, Zn, Cu, Mn, 11 = Superfosfato triple, 12 = Sulfato de magnesio, 13 = Acido fosfórico, 14 = Acido sulfúrico, 15 = Acido nítrico.
I = Incompatible, R = Solubilidad reducida.

En la Tabla 3 se ilustra el efecto del pH sobre el potencial de volatilización del amoníaco.

Tabla 3. Potencial de volatilización del N de acuerdo al pH del medio.

pH del Suelo/Agua	Potencial de volatilización del N (%)
7.2	1
8.2	10
9.2	50
10.2	90
11.2	99

Si el pH del agua o del suelo al que se añade el fertilizante amoniacal es 9.2 por ejemplo, el 50 % del N pasa a formar amoníaco (NH_3). Este porcentaje representa el potencial de volatilización del N.

Formación de precipitados

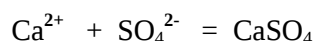
La aparición de una fase sólida en el seno de un líquido (solución fertilizante), puede ocurrir por la adición de una sustancia que forme un producto insoluble con alguno de los iones de la solución, o porque la concentración de dicha solución ha sobrepasado el límite de saturación. Esta condición recibe el nombre de precipitación.

Por ejemplo, cuando se mezcla nitrato de calcio (solubilidad = 129.4 g/100 ml agua a 20 °C) y sulfato de amonio (75.4 g/100 ml agua a 20 °C), esta mezcla en disolución acuosa provoca la formación de sulfato de calcio, prácticamente insoluble (0.2 g/ 100 ml de agua). Las reacciones que llevan a esta situación son las siguientes:

Disolución individual de los materiales



En la mezcla se produce la siguiente reacción:



Esta última reacción inmoviliza el Ca cuando se está tratando de usar el $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ como fuente de Ca.

De manera general, para evitar riesgos de precipitación no se deben mezclar sales que aporten Ca

con aquellas que aporten sulfatos (SO_4^{2-}) o fosfatos (HPO_4^{2-} y H_2PO_4^-), ya que las sales formadas son insolubles. Si es necesario por ejemplo utilizar nitrato de calcio, fertilizante de alta solubilidad, éste no debe mezclarse con un fertilizante fosforado, e inclusive conviene tomar la precaución de aplicar el P dos días después del nitrato de calcio.

En soluciones acuosas de sales, el pH es un indicativo conveniente para determinar la relación de iones, sales y precipitados. El siguiente ejemplo ilustra dicho efecto:

Cuando se añade simultáneamente amoníaco (NH_3) y ácido ortofosfórico (H_3PO_4) y se controla el pH manteniéndolo en 5.8 durante la preparación de la solución, no se afecta la solubilidad de los compuestos y por lo tanto no existirá precipitación. Por encima de pH 5.8 se empiezan a formar cristales de fosfato diamónico, si el pH supera 7.8, existirá pérdida de amoníaco, como también la posibilidad de la precipitación de fosfato triamónico. Por debajo de pH 5.8 se pueden precipitar cristales de fosfato monoamónico, y si es menor a 4.7, existirá corrosión en los equipos.

De otra parte el uso de los polifosfatos ofrece una ventaja muy importante, pues usualmente secuestran o disuelven grandes cantidades de calcio y magnesio, evitando así su precipitación.

Conviene también considerar la calidad de agua a utilizar en la preparación de soluciones, pues en el caso de aguas duras (elevado contenido de Ca y Mg, alcalinidad considerable, pH básico), aun tomando en cuenta la compatibilidad entre fertilizantes, persiste el riesgo de precipitación, fundamentalmente de compuestos cálcicos (sulfatos y carbonatos), hierro y manganeso que pueden pasar a sus formas oxidadas insolubles. De igual manera, aguas ricas en sulfuros que pueden precipitar compuestos insolubles. Es necesario entonces acidificar el agua como un tratamiento preventivo para que la precipitación cálcica no ocurra. La cantidad de ácido a añadirse responde a una curva de neutralización efectuada en laboratorio sobre el agua a utilizarse.

Cuando se trabaja con aguas ácidas con contenidos de Fe mayores a 0.1 ppm se pueden presentar problemas de precipitados. En este caso un tratamiento preventivo involucra una oxidación del agua con aire, permanganato de potasio o cloración.

En una solución de uso común en fertigación se puede analizar los procesos básicos que llevan a la

formación de precipitados. Se propone la preparación de una solución de la siguiente concentración: **150 ppm de N, 150 ppm de K, 40 ppm de P y 10 ppm de Zn, Cu, Mn y B.**

Fuentes:

Urea (46-0-0)
Nitrato de potasio (13-0-44)
Sulfato de potasio (0-0-50)
Sulfato de manganeso tetrahidratado (27 % Mn)
Sulfato de cobre pentahidratado (25 % Cu)
Sulfato de zinc heptahidratado (36 % Zn)
Borax 11 % B
Acido fosfórico (0-52-0)

Con el uso de estos fertilizantes para preparar la solución existe riesgo de precipitación por formación de sales poco solubles como: fosfato de zinc $[Zn_3(PO_4)_2]$, hidróxido de zinc $[Zn(OH)_2]$ e hidróxido de manganeso $[Mn(OH)_2]$ dependiendo del pH y de las concentraciones de los iones involucrados. La preparación de esta solución podría encontrar las siguientes situaciones:

Si se utiliza agua químicamente pura, el pH de la solución estará determinado por el ácido fosfórico adicionado, (0.176 g/l de solución), con un valor de 2.95.

La concentración de Zn es 1.53×10^{-4} M y la del oxidrilo es 9.02×10^{-12} M, el producto de la mismas no supera el valor del Kps del hidróxido de zinc, por lo tanto no existirá precipitado de este tipo.

$$[Zn^{2+}] [OH^-]^2 = 1.24 \times 10^{-26} < Kps = 1.8 \times 10^{-14}$$

Para el caso del fosfato de zinc se tiene una concentración de $PO_4^{3-} = 2.68 \times 10^{-17}$, por lo que:

$$[Zn^{2+}]^3 [PO_4^{3-}]^2 = 2.57 \times 10^{-45} < Kps = 1.0 \times 10^{-32}, \text{ no existirá precipitado de } Zn_3(PO_4)_2.$$

Para el hidróxido de manganeso, de igual manera con una concentración de Mn de 1.82×10^{-4} , se tiene:

$$[Mn^{2+}] [OH^-]^2 = 1.48 \times 10^{-26} < Kps = 4.0 \times 10^{-14}, \text{ no precipitará este hidróxido.}$$

Si en la preparación de la solución se utiliza agua dura de las siguientes características: pH = 8.17; Conductividad eléctrica = 0.921 mmhos/cm; $CO_3^{2-} = 0$ meq/l; $HCO_3^- = 7.79$ meq/l; Ca = 3.24 meq/l. En este caso existe la posibilidad de precipitación de carbonato de calcio ($CaCO_3$), sulfato de

calcio ($CaSO_4$), fosfato de calcio ($CaHPO_4$), además de los compuestos enumerados en el primer caso.

En cuanto a la precipitación del carbonato de calcio, ésta puede ser controlada a través del pH. Se puede calcular el pH al cual un agua con una determinada alcalinidad y contenido en Ca está en equilibrio, ni sobresaturada ni subsaturada de carbonato cálcico.

En este ejemplo el pH es 7.26. Con la cantidad de ácido fosfórico añadido para satisfacer la necesidad de P el pH del agua bajará de 8.17 a 7.47, por lo que es necesario adicionar más ácido, por ejemplo ácido clorhídrico, hasta llegar al valor del pH requerido. Esto garantiza no sólo que no se precipitará carbonato de calcio, sino también que se disolverán los precipitados calizos.

Con este pH de 7.26 se puede calcular las concentraciones respectivas y evidenciar si existe o no precipitación del hidróxido de zinc $[Zn(OH)_2]$, hidróxido de manganeso $[Mn(OH)_2]$, fosfato de zinc $[Zn_3(PO_4)_2]$ y sulfato de calcio ($CaSO_4$), de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} [Zn^{2+}] &= 1.53 \times 10^{-4} \\ [OH^-] &= 1.84 \times 10^{-7} \\ [Zn^{2+}] [OH^-]^2 &= 5.18 \times 10^{-18} < Kps = 1.8 \times 10^{-14}; \\ &\text{no precipitará hidróxido de zinc.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [Mn^{2+}] &= 1.82 \times 10^{-4} \\ [OH^-] &= 1.84 \times 10^{-7} \\ [Mn^{2+}] [OH^-]^2 &= 6.16 \times 10^{-18} < Kps = 4.0 \times 10^{-14}; \\ &\text{no precipitará hidróxido de manganeso.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [Ca^{2+}] &= 1.62 \times 10^{-3} \\ [SO_4^{2-}] &= 1.131 \times 10^{-3} \\ [Ca^{2+}] [SO_4^{2-}] &= 1.83 \times 10^{-6} < Kps = 2.45 \times 10^{-5}; \\ &\text{no precipitará sulfato de calcio.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [Zn^{2+}] &= 1.53 \times 10^{-4} \\ [PO_4^{3-}] &= 5.99 \times 10^{-9} \\ [Zn^{2+}]^3 [PO_4^{3-}]^2 &= 1.28 \times 10^{-28} > Kps = 1.0 \times 10^{-32}; \\ &\text{precipitará fosfato de zinc.} \end{aligned}$$

Si precipita fosfato de zinc habrá una pérdida en la concentración tanto de Zn como de P por lo que es necesario, a través de una especiación química, calcular que cantidad de precipitados se formaron y que cantidad de iones disponibles existen en solución.

La concentración inicial de Zn^{2+} de 1.53×10^{-4} M, se reduce a 1.54×10^{-6} M, luego de la precipitación

del fosfato de zinc. Además, aunque no precipite hidróxido de zinc este también se forma en pequeña cantidad. Por esta razón, lo que de los 10 ppm de Zn^{2+} iniciales, quedarán 0.1 ppm al finalizar la preparación de la solución.

Analizando el P, también por especiación química, veremos que como fosfato de zinc (precipitado) se tiene 1.59×10^{-4} M, y como fosfato de calcio ($\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$) 2.24×10^{-5} M, reduciéndose el P en solución de 40 ppm iniciales a 29.45 ppm.

Como se observa, el pH de una solución, la calidad de agua utilizada en la preparación de la misma, así como la concentración de los distintos compuestos involucrados, juegan un papel fundamental dentro de las posibles precipitaciones a ocurrir en el seno de una solución.

Reducción de la solubilidad

Cuando se mezclan soluciones de sales solubles, como por ejemplo el cloruro de potasio (KCl) con una solubilidad de 34.2 g / 100 ml agua y el sulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ con 75.4 g / 100 ml, se forman sales en el seno de la solución que aunque son solubles, ésta solubilidad es menor que la original. En el caso anterior, los productos formados serían el sulfato de potasio (K_2SO_4) con una solubilidad de 11.1 g / ml agua y cloruro de amonio (NH_4Cl). En este caso incluso se podría precipitar el sulfato de potasio si las concentraciones de ion sulfato y del ion potasio superan el valor del producto de solubilidad (8).

Presencia de un ion común

La presencia de un ion común en una solución disminuye la solubilidad de los compuestos. Por ejemplo, la solubilidad del KCl en solución se reduce en presencia de HCl o MgCl_2 que aportan un ion común (Cl) a la misma solución. La solubilidad del sulfato de potasio disminuye por la presencia de cloruro de potasio o de sulfato de amonio. El sulfato de potasio se vuelve prácticamente insoluble en una solución saturada de sulfato de amonio. Este comportamiento obedece al principio de Le Chatelier, el cual establece que cuando una reacción química en equilibrio es sometida a un cambio de condiciones (concentración, presión, temperatura) la composición se ajusta para minimizar el cambio (15). Este es un problema común en la preparación de soluciones para fertigación que puede reducir significativamente la concentración de iones en la solución.

Inestabilidad de los complejos

Los quelatos de Fe, Zn, Cu y Mn, usados como fuentes de micronutrientes, son inestables a pH ácidos, ya que los iones hidrógeno compiten con el catión del quelato por los pares electrónicos que producen la quelatación. Por esta razón se consideran incompatibles con soluciones fuertemente ácidas, puesto que aunque no ocurra precipitación inmediata, los cationes pierden la protección que les da el complejo y posteriormente pueden precipitar fácilmente.

SOLUCIONES PARA FERTIRRI-GACION

Las soluciones utilizadas en fertigación son soluciones nutritivas que no están completamente balanceadas, ya que son preparadas para suministrar ciertos elementos esenciales a las plantas. Algunas características de las soluciones nutritivas utilizadas en hidroponía pueden ser también consideradas en los sistemas de fertigación. Entre las más importantes están las siguientes:

Balance y concentración de nutrientes

Se deberá suministrar todos los elementos esenciales para las plantas. En mayor concentración (milimoles/litro) están los elementos N, P, K, Ca, Mg y S. En menor concentración (micromoles/litro) irán los elementos Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, Cl, B. La concentración relativa de los elementos está basada en resultados experimentales.

Formas asimilables de los elementos

Todos los elementos deben estar en solución con forma asimilable. La Tabla 4 presenta las formas aniónicas y catiónicas asimiladas por las plantas desde el suelo.

Tabla 4. Formas asimilables de los nutrientes por las plantas.

Cationes	Aniones
K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	NO_3^- , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}
NH_4^+	H_2BO_3^- , MoO_4^{2-}
Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+}	SO_4^{2-} , Cl^-

Intervalo de pH.

La mayoría de las plantas crecen muy bien con soluciones nutritivas de pH 5 a 6.5. Se considera, en términos generales, que el mantener la solución en un pH de 6 a 6.5 favorece un crecimiento vegetal satisfactorio. Esto impide una lesión a la raíz por alta acidez o alta alcalinidad. No se aconseja llegar a un pH de 7 porque la mayoría de fósforo se encuentra como HPO_4^{2-} cuya velocidad de absorción por la planta es menor que la de H_2PO_4^- .

Relación NH_4^+ / NO_3^-

El N presente en estas dos formas en la solución ayuda a mantener el pH del suelo puesto que cuando la planta absorbe cationes expulsa al medio H^+ (baja el pH), si absorbe aniones expulsa OH^- ó HCO_3^- (sube el pH). En el suelo es difícil mantener una relación NH_4^+ / NO_3^- constante debido al fenómeno de nitrificación que transforma el NH_4^+ en NO_3^- .

Presión osmótica

El agua entra a la planta por presión osmótica. Las soluciones nutritivas, ó la solución del suelo, no deben ser muy concentradas porque impiden la absorción del agua por la planta. Se considera que una solución nutritiva no debe tener más de 2 atmósferas de presión osmótica. Esto quiere decir una concentración de sales alrededor de 1500 ppm. Por esta razón se debe evitar al máximo la adición de iones no útiles en el sistema como sodio.

PREPARACION DE SOLUCIONES

Para preparar una solución en fertigación se debe conocer las necesidades específicas de los cultivos y las fuentes disponibles, sin olvidar los cuidados de manipulación de los materiales. Por ejemplo, en la preparación de soluciones N-P-K para cultivos en invernadero existen varias alternativas, una de las cuales se presenta a continuación:

- 1) Utilizando KNO_3 como fuente de K. En función de las necesidades de K calcular la cantidad de KNO_3 a usarse en la solución. Se puede utilizar también sulfato de potasio como fuente de K
- 2) Utilizando DAP como fuente de P. En función de los requerimientos de P, calcular la cantidad de DAP necesaria. Se puede usar también MAP como fuente de P.
- 3) Si se utiliza DAP es necesario rebajar el pH hasta 6.3 con ácido nítrico, a razón de 1.3 kg de ácido nítrico por kg de DAP.

- 4) Al N necesario se le resta el aportado por el nitrato de potasio, por el fosfato y por el ácido nítrico, la diferencia se puede suplir con nitrato de amonio ó urea. En la práctica se aconseja seguir el siguiente procedimiento:
 - a) Añadir lentamente el ácido nítrico al agua.
 - b) Añadir el nitrato de potasio requerido.
 - c) Añadir el fosfato diamónico o monoamónico.
 - d) Añadir el nitrato de amonio
 - e) Agitar al menos durante 15 minutos.

La primera fase de cada riego y particularmente la última deben realizarse con agua sola para evitar obturaciones en los emisores y para poder contar con suelo húmedo para una mejor distribución de nutrientes (3).

En muchos cultivos, particularmente en los cultivos nuevos de exportación, se desconoce los requerimientos nutricionales y por lo tanto la composición de la solución nutritiva. En una primera aproximación para la fertilización continua se aconseja utilizar soluciones completas “estándar” o “universales” que posteriormente se van modificando, según experiencia y control mediante análisis de suelo o foliar.

Una solución muy utilizada en horticultura es la de Coic-Lesaint, cuya composición es:

- 12.2 meq/l de N nítrico.
- 2.2 meq/l de N amoniacal.
- 5.2 meq/l de K.
- 6.2 meq/l de Ca.
- 1.5 meq/l de Mg.
- 2.2 meq/l de PO_4 .
- 1.5 meq/l de SO_4 .
- pH = 5.8 a 6
- CE = 1.7 mmhos/cm.

En algunos casos se pueden utilizar soluciones menos concentradas de 10.5 ó 7.2 meq/l de N.

Otra es la solución “universal” de Steiner :

- 12.0 meq/l de NO_3 .
- 1.0 meq/l de PO_4H_2 .
- 7.0 meq/l de SO_4 .
- 9.0 meq/l de Ca.
- 7.0 meq/l de K.
- 4.0 meq/l de Mg.
- pH = 6.5 - 7.5

Conociendo la composición de la solución que se quiere preparar y la composición del agua de riego se podrá definir las cantidades de nutrientes que es

necesario añadir para elaborar la solución. Es importante conocer el pH y la curva de neutralización del agua de riego, por si fuese necesario aplicar ácido para bajar el pH ó una base para subirlo.

Por otro lado, si se conoce la proporción en que se va a inyectar la solución en la red de riego, se calcula el volumen y composición de la solución “madre” a preparar, y se determina las cantidades de los distintos fertilizantes a disolver (11).

PRECAUCIONES EN LA PREPARACION DE SOLUCIONES

Una vez elaborada la tabla de cálculo de requerimientos de cada fertilizante se procede a pesar los productos por bloque o por dosificación de riego. Esta operación debe ser cuidadosa para no cometer errores de dosificación.

Realizar una premezcla para disolver los fertilizantes en poca agua.

En el tanque de inyección la agitación debe ser permanente para conservar al máximo la homogeneidad de la solución

Al acidificar el agua, siempre coloque el ácido sobre el agua y no al inverso.

El analizar cada 3 o 4 meses las soluciones nutritivas es un buen método de chequeo, sobre todo en relación con incompatibilidades que se puedan presentar dentro de la red.

BIBLIOGRAFIA

1. Agricultural Retailers Association. 1994. Fluid fertilizers. Ed. ARA St. Louis Mo. Vol.1.
2. Agricultural Retailers Association. 1994. Fluid fertilizers. Ed. ARA St. Louis Mo. Vol.2.
3. Amézquita, E. 1997. Requerimientos de Agua y Nutrición de Cultivos de Flores. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santa Fe de Bogotá, Colombia. p. 73-90.
4. Boaretto, R.E., Cruz, A.P. e P.H.C Luz. 1991. Adubo liquido: Producao e uso no Brasil. Cargill, Campinas, S.P. p. 9-41.
5. Burriel. 1981. Química Analítica Cualitativa. 10 a. Ed. Paraninfo, Madrid. p. 69-89.
6. Correa, V., e E. Gómez. 1992. Fertilizantes Fluidos. XX Reuniao Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutricao de Plantas. Piracicaba. p. 255-275. 2
7. Costa, E. F., R.F. Vieira, e P.A. Viana. 1994. Quimigacao. Aplicacao de Productos Químicos e Biológicos via Irrigacao. Embrapa, Brasilia. p. 183-227.
8. Estrada, G. 1997. Caracterización y Preparación de Fertilizantes Líquidos para Fertirrigación. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santa Fe de Bogotá, Colombia. p. 61-72.
9. Frizzone, J.A., e T.A. Botrel. 1993. Aplicacao de Fertilizantes Via Agua de Irrigacao. Simposio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluidos. Piracicaba. p. 227-260.
10. Jovanovich, H. 1988. Química Universitaria. HBJ. Bogotá Colombia. p. 164-173.
11. López, R. 1992. Riego Localizado. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 189-214.
12. Pizarro, F. Riegos Localizados de Alta Frecuencia. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 285-312.
13. Villas, R., A.E. Boaretto, e G.C. Vitti, G.C. 1993. Aspectos da Fertirrigacao. Simposio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluidos. Piracicaba. p. 283- 308.
14. Vitti, G.C., A.E. Boaretto, e S.R. Penteado. 1993. Fertilizantes e Fertirrigacao. Simposio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluidos. Piracicaba. p. 261-281.
15. Vogel, A. 1960. Química Analítica Cuantitativa. Kapelus. Buenos Aires, Argentina. Vol 1.
16. Zapata, R. 1997. Propiedades Químicas de las Soluciones en Fertirriego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santa Fe de Bogotá, Colombia. p. 73-90.

ACIDEZ Y ENCALADO DE LOS SUELOS

José Espinosa*

LA ACIDEZ DEL SUELO

Un ácido es una sustancia que tiende a entregar protones (iones hidrógeno). Por otro lado, una base es cualquier sustancia que acepta protones. La acidez de una solución está determinada entonces por la actividad de los iones hidrógeno (H^+). Haciendo uso de estos principios químicos, la acidez en el suelo se determina midiendo la actividad de H^+ en la solución del suelo y se expresa con un parámetro denominado potencial hidrógeno (pH).

Los ácidos se disocian poco y en las soluciones acuosas se presentan concentraciones muy bajas de iones H^+ , tan bajas que es difícil presentarlas numéricamente en términos de molaridad. Por esta razón se define el pH en forma logarítmica. En realidad el pH se define como la inversa del logaritmo de la actividad de iones H^+ de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$pH = \log \frac{1}{(H^+)} \quad (1)$$

Así a pH 7.0 por ejemplo, la actividad (concentración) de iones H^+ es igual a 0.0000001 moles de H^+ por litro. La inversa de 0.0000001 es igual a 10000000 y el logaritmo de este número es 7.

La escala del pH cubre un rango que va de 0 a 14. Un valor de 7.0 es neutro (igual número de iones H^+ y OH^- en la solución) mientras que valores menores que 7.0 son ácidos y valores mayores que 7.0 son básicos.

El significado práctico de la expresión logarítmica de los valores del pH es que a cada unidad de cambio en pH corresponde un incremento de 10 veces en la cantidad de acidez o basicidad del suelo. En otras palabras, un suelo con pH 5.0 tiene 10 veces más H^+ activo que un suelo con pH 6.0. Esto tiene un enorme significado en la nutrición de los cultivos y en el manejo efectivo de los fertilizantes. La Tabla 1 compara el grado de acidez o basicidad en relación al pH neutro (7.0).

Tabla 1. pH del suelo y el grado de acidez o basicidad.

pH del suelo	Acidez / Basicidad comparadas con pH 7.0	
9.0	Basicidad	100
8.0		10
7.0	Neutro	
6.0		10
5.0	Acidez	100
4.0		1000

MEDICION DE LA ACIDEZ DEL SUELO

La acidez del suelo se puede medir de dos formas diferentes. Una de ellas es con el uso de papel indicador, método que sirve como un diagnóstico rápido en el campo. Este método debe ser utilizado por operadores con experiencia para evitar errores, pero es un buen índice de campo que permite hacer un diagnóstico más o menos aproximado del pH del suelo.

El método más preciso y ampliamente utilizado hace uso del potenciómetro. Con este método se determina el pH del suelo al poner en contacto una suspensión de suelo y agua destilada con un electrodo de vidrio y otro de referencia conectados a un potenciómetro que interpreta y entrega el resultado en la escala calibrada del aparato. Cuando se ha estandarizado el aparato con soluciones tampón de pH conocido, el aparato mide el pH de la suspensión al transformar la lectura de los milivóltios del potencial generado cuando se colocan los dos electrodos en la suspensión de suelo.

El electrodo de vidrio es sensible al H^+ y es el que desarrolla los cambios en potencial (voltaje), cambio que es proporcional al logaritmo de los cambios de actividad del H^+ y por esta se lo conoce como el electrodo indicador. Este electrodo es esencialmente un tubo de vidrio con una membrana muy delgada de vidrio en la punta. Debido a que la medición de pH por métodos electrométricos requiere de medición de voltaje, se debe mantener un circuito completo para el flujo de electro-

*Director del Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS), Quito - Ecuador

nes. Esto requiere de un segundo electrodo o electrodo de referencia hecho de calomel ($\text{Hg-Hg}_2\text{Cl}_2$). Este electrodo es también un tubo de vidrio con un agujero muy pequeño en la punta que contiene una solución saturada de KCl en contacto con un electrodo estándar de $\text{Hg-Hg}_2\text{Cl}_2$ que se encuentra en el interior. Este electrodo está en contacto con el medidor de voltaje. El KCl sirve como puente para contactar la solución ha medirse con el electrodo de calomel que tiene un voltaje característico. La diferencia existente entre la solución y el electrodo de referencia es lo que mide el potenciómetro y lo transforma a unidades de pH.

Si bien esta determinación de laboratorio es bastante confiable existen ciertos factores que afectan la determinación del pH en suspensiones de suelo. Un error en la medición del pH se produce por el efecto conocido como potencial de unión, que ocurre al sumergir el electrodo de referencia en la suspensión de suelo. Las cargas negativas del suelo atraen el ion K^+ del KCl que fluye del electrodo provocando un movimiento más rápido de este catión en relación con el ion Cl^- provocando una diferencia extra de potencial que se refleja en la medición total de pH.

Otro factor que influencia la medición del pH es el denominado efecto de suspensión. Cuando se mide el pH en suspensiones suelo-agua, los resultados son más bajos inmediatamente después de la agitación. Cuando se suspende la agitación, con los electrodos dentro de la suspensión y las partículas de suelo en proceso de decantación, el pH medido es gradualmente más alto debido a que los electrodos solamente miden la actividad del H^+ presente en la solución de equilibrio.

La medición de pH está también influenciada por la dilución de la suspensión suelo-agua. Cuando más diluida es la suspensión mayor es el pH debido a la descompresión de la doble capa difusa por la dilución (menor concentración) de la solución en contacto con el suelo. Por esta razón se aconseja ser consistente en la relación suelo-agua utilizada en la determinación de pH. Las relaciones más comunes son 1:1 y 1:2.5 suelo-agua.

La acumulación de sales en el suelo también afecta las mediciones de pH. Esto puede ocurrir por procesos naturales como la mineralización de la materia orgánica o por la aplicación de fertilizantes. Esta es la razón por la que las lecturas de pH cambian cuando se toma un muestra de un mismo sitio en diferentes épocas del año. La presencia de sales reduce el pH y esto se debe en parte a la compresión

de la doble capa difusa causada por el incremento de concentración de los electrolitos. Por esta razón se aconseja determinar el pH en una solución de CaCl_2 0.01M. Esto debe a que el pH medido en CaCl_2 no es afectado por la relación suelo-agua, la cantidad de sal adicionada es suficientemente alta para nivelar los efectos salinos de las sales que normalmente se encuentran en el suelo y porque la concentración de CaCl_2 utilizada no es diferente a las concentraciones normalmente encontradas en la solución del suelo de suelos de alta fertilidad y/o fertilizados abundantemente.

Otro fenómeno interesante en la determinación del pH es el efecto de la concentración (presión parcial) de CO_2 en la atmósfera. Antes que un efecto directo en la medición de pH de la suspensión suelo-agua el efecto de la presencia de CO_2 se observa en pH del agua en el laboratorio y esto siempre causa confusiones. La atmósfera contiene alrededor de 0.03% de CO_2 y éste se disuelve fácilmente en el agua formando ácido carbónico (H_2CO_3). Por esta razón, aun el agua pura (destilada o desionizada) en equilibrio con el CO_2 de aire puro tienen un pH de 5.72 y en condiciones de laboratorio, con mala ventilación o con presencia de muchas personas, la concentración de CO_2 se incrementa y el pH del agua es más bajo.

Cuando se mide el pH en la solución suelo-agua, los dos componentes se mezclan mediante agitación o batido de modo que la solución entra en equilibrio con el CO_2 del aire, a la concentración presente en el laboratorio. Un suelo ácido tiene una capacidad mucho mayor de suplir H^+ que el CO_2 en el aire y por lo tanto este factor prácticamente no tiene efecto en la medición del pH de la solución. Solamente en suelos donde la concentración de H^+ es muy baja (pH mucho más alto que 7.0) y particularmente aquellos suelos que tienen CaCO_3 libre, el CO_2 del aire afecta apreciablemente la medición del pH.

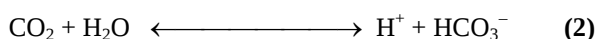
NATURALEZA DE LA ACIDEZ DEL SUELO

Remoción de Nutrientes

Un suelo con pH neutro tiene saturada la fase de intercambio con cationes básicos (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+). Estos cationes denominados contra-iones satisfacen la carga eléctrica de la superficie de los coloides del suelo. La acidificación del suelo se inicia con la pérdida de cationes debido en parte a la acción de las raíces. La planta al absorber catio-

nes, para mantener el equilibrio en la solución, libera H^+ que contribuye a la reducción del pH del suelo. Por otro lado, el movimiento de cationes a capas inferiores contribuye también a la acidificación del suelo. El movimiento de cationes a capas inferiores se debe a la presencia de iones de carga igual a la carga de la superficie de las arcillas denominados co-iones. En la solución del suelo de la mayoría de suelos agrícolas los co-iones son aniones que se encargan de arrastrar los cationes con el movimiento del agua en el perfil.

En el inicio, el aporte de co-iones a la solución del suelo se produce por medio de la mineralización de la materia orgánica que produce aniones como NO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- que son los que arrastran los cationes del perfil. Por otro lado, la materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos produciendo un constante suplemento de CO_2 que fácilmente se transforma en bicarbonato (HCO_3^-) de acuerdo a la siguiente reacción:



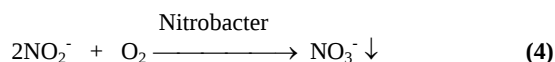
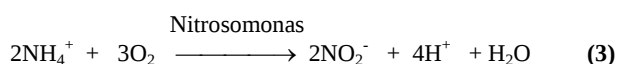
Esta reacción aporta con H^+ y el HCO_3^- formado se combinan fácilmente con los cationes de la solución lavándolos del perfil promoviendo de esta forma condiciones de acidez.

La materia orgánica del suelo contiene también grupos carboxílicos y fenólicos activos que se disocian liberando iones H^+ a la solución del suelo. El contenido de materia orgánica varía de sitio a sitio y por lo tanto su contribución a la acidez del suelo es también variable.

Utilización de Fertilizantes Nitrogenados

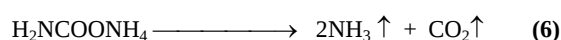
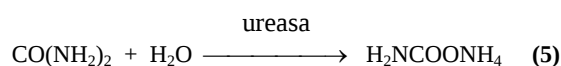
Los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio (NH_4^+) incrementan la acidez del suelo a menos que la planta absorba NH_4^+ directamente. Ejemplos de estos fertilizantes son el sulfato de amonio $(NH_4)_2SO_4$, nitrato de amonio (NO_3NH_4) y la urea $CO(NH_2)_2$.

El $(NH_4)_2SO_4$ y el NO_3NH_4 aplicados al suelo se disocian liberando amonio (NH_4^+). Esta forma de N se convierte en nitrato (NO_3^-) a través de oxidación biológica. El proceso que hace posible esta transformación se denomina nitrificación y se representa con las siguientes reacciones:



Como se observa la nitrificación produce un exceso de H^+ que acidifica el suelo. Este es un proceso natural necesario para transformar el NH_4^+ en NO_3^- debido a que las plantas utilizan principalmente NO_3^- en su nutrición. Por otra parte, estas reacciones requieren oxígeno por lo tanto es necesario que el suelo se encuentre bien aireado para que el proceso tenga lugar.

La utilización de urea produce también acidificación del suelo aun cuando las reacciones iniciales son diferentes. Después de la aplicación al suelo, la urea es atacada por la enzima ureasa facilitando la hidrólisis y formando carbamato de amonio que es un compuesto inestable. Esta reacción eleva el pH en la inmediata vecindad del gránulo a valores mayores que 8.0. En este ambiente alcalino el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoníaco (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2). Estas reacciones se describen a continuación:



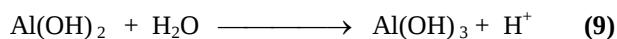
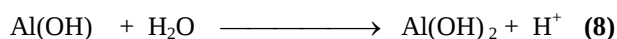
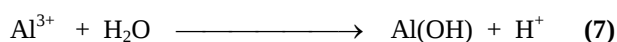
El NH_3 formado al final de estas reacciones es un gas que se volatiliza fácilmente de la superficie del suelo perdiéndose de esta forma apreciable cantidad de N del sistema. El NH_3 en contacto con agua se transforma en amonio (NH_4^+) permaneciendo en esta forma estable en el suelo. Es por esta razón que es aconsejable el incorporar la urea en el suelo para evitar volatilización.

El NH_4^+ formado después de la hidrólisis de la urea pasa por los mismos procesos de oxidación biológica o nitrificación al igual que el amonio de otras fuentes nitrogenadas. Como ya se discutió anteriormente este proceso lleva inevitablemente a la acidificación del suelo.

Es importante indicar también que la mineralización de la materia orgánica también produce NH_4^+ como producto final del proceso de descomposición. Este NH_4^+ contribuye de igual forma a la acidificación del suelo después de que forzosamente pasa por el proceso de nitrificación descrito anteriormente.

Aluminio Intercambiable

Se ha reconocido ampliamente que uno de los principales factores en el desarrollo de la acidez del suelo es la presencia de aluminio (Al^{3+}) en la solución del suelo. Los iones Al^{3+} desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxialumínicos. Las reacciones de hidrólisis del Al^{3+} son similares a la reacción de un ácido fuerte ya que libera iones H^+ . La constante de disociación (pK) es igual a 5.0 muy similar a la del ácido acético. La hidrólisis de las formas monoméricas del Al se ilustran en las siguientes reacciones:



Cada una de estas reacciones libera H^+ y contribuye a la acidez del suelo. Este incremento en acidez promueve la presencia de más Al^{3+} listo para reaccionar nuevamente. La Figura 1 describe el comportamiento de las diferentes formas monoméricas del Al con respecto al pH de una solución. Se observa que el Al aparece en la solución a pH 5.3 y que arriba de este pH se inicia la formación de Al(OH)_3 que se precipita eliminando el Al de la solución. Estas reacciones son importantes en el control de acidez como se discute más adelante.

CLASIFICACION DE LA ACIDEZ

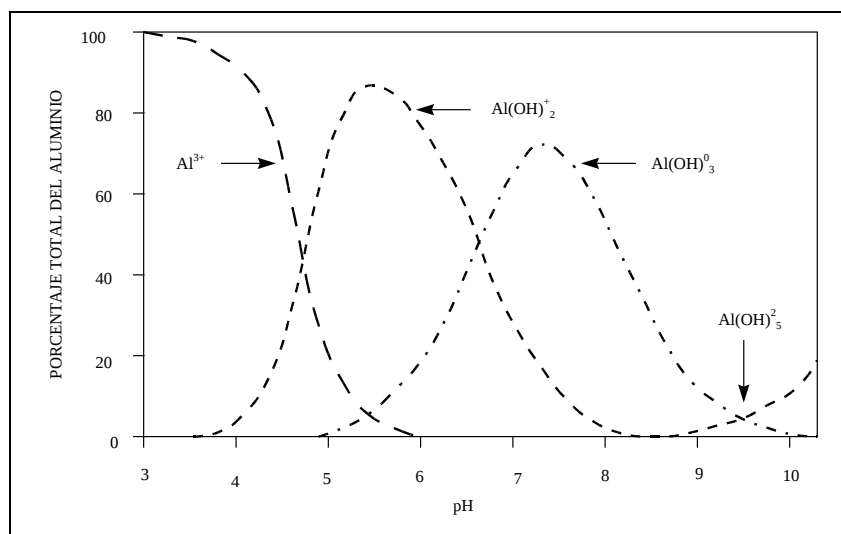


Figura 1. Distribución porcentual de las formas de Al en una solución de acuerdo al pH.

La acidez de proveniente de las fuentes mencionadas anteriormente se puede clasificar de la siguiente forma:

Acidez Activa: Hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo y proveniente de diferentes fuentes.

Acidez intercambiable: Hidrógeno y aluminio intercambiables (H^+ , Al^{3+}) retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas.

Acidez no intercambiable: Hidrógeno en enlace covalente en la superficie de los minerales arcillosos de carga variable.

Acidez Potencial: Acidez intercambiable + acidez no intercambiable.

ENCALADO

El encalado es la operación por la cual se aplica al suelo compuestos de calcio o calcio y magnesio que son capaces de reducir la acidez e incrementar el pH.

Existen varios materiales que son capaces de reaccionar en el suelo y elevar el pH. Entre los más comunes se pueden citar: óxido de calcio, hidróxido de calcio, calcita y dolomita.

Oxido de Calcio

El óxido de calcio (CaO), también conocido como cal viva, es un polvo blanco muy difícil y desagradable de manejar. Se fabrica calcinando al horno piedra caliza y la pureza depende del material primario. Cuando se aplica al suelo reacciona de inmediato de manera que este material es ideal cuando se desean resultados rápidos (iguales resultados se obtienen con el hidróxido de calcio). Este material debe mezclarse inmediatamente con el suelo debido a que se endurece rápidamente al ponerse en contacto con la humedad del suelo, haciéndose inefectivo.

Hidróxido de Calcio

El hidróxido de calcio [Ca(OH)_2] se

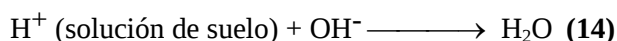
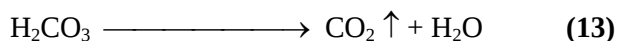
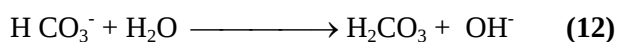
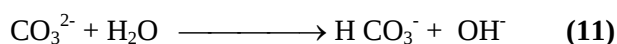
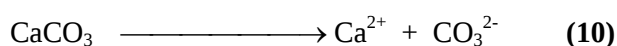
conoce también como cal apagada o cal hidratada. Es una sustancia blanca, polvorienta difícil y desagradable de manejar. Se prepara hidratando el CaO. Este material también reacciona en el suelo rápidamente y se debe también incorporar inmediatamente.

Calcita y Dolomita

El carbonato de calcio cristalino (CaCO_3) es conocido como calcita mientras que el carbonato doble de calcio y magnesio ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) se denomina dolomita. La calidad de estos materiales depende del contenido de impurezas como arcillas y material orgánico. El valor de neutralización de estas cales varía entre 65 y algo más del 100%. El valor de neutralización del carbonato de calcio puro ha sido establecido como de 100% y sirve como punto de referencia para calificar el valor de neutralización de las cales. Como regla general el valor de neutralización de la mayoría de las cales está entre 90 y 98% debido a impurezas.

REACCIONES DE LA CAL EN EL SUELO

Los mecanismos de reacción de los materiales encalantes en el suelo permiten la neutralización de los iones H^+ en la solución del suelo por medio de los iones OH^- producidos al entrar en contacto la cal con el agua del suelo. Es por esta razón que la cal es efectiva solamente cuando existe humedad en el suelo. Las reacciones básicas de la cal en el suelo pueden ser ilustradas con el caso del carbonato de calcio o calcita. Estas reacciones se presentan a continuación:



La tasa de las reacciones arriba indicadas y por lo tanto la disociación del CaCO_3 está directamente relacionada con la tasa a la cual los iones OH^- son removidos de la solución del suelo a través de la neutralización del H^+ y la formación de H_2O . Mientras exista H^+ en la solución del suelo el Ca^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- y H_2CO_3 continuarán apareciendo en la solución. En esta forma el pH aumenta

debido a que disminuye la concentración de H^+ en el suelo.

Es interesante el indicar que el ion calcio (Ca^{2+}) proveniente de la disolución del CaCO_3 no interviene en las reacciones de incremento del pH. Este catión pasa simplemente a ocupar sitios de intercambio en la superficie de los coloides del suelo y servirá como nutriente de las plantas.

Por otro lado, también es interesante el notarse que es el ion carbonato (CO_3^{2-}) el que realmente eleva el pH al hidrolisarse y producir iones OH^- . Además es importante indicar que el ion CO_3^{2-} se disipa como CO_2 después de las reacciones de hidrólisis. Esta es la razón por la cual el efecto de la cal se limita al lugar de aplicación. En otras palabras, la aplicación superficial de cal no afecta el pH de capas inferiores debido a que la cal no migra a través del perfil sino más bien se disipa como CO_2 en el sitio de aplicación. Este aspecto es importante en el manejo del encalado.

El efecto final de las reacciones de la cal reduce la acidez del suelo (incrementa el pH) al convertir el exceso de H^+ en H_2O . Sin embargo, es muy importante observar que el efecto del encalado va más allá de estas reacciones. El incremento de pH permite la precipitación del Al^{3+} como $\text{Al}(\text{OH})_3$, que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al^{3+} en las plantas y la principal fuente de iones H^+ .

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES PARA ENCALADO

Un factor importante en el encalado de los suelos es el grado de fineza o tamaño de las partículas de la cal a utilizarse. Esto se debe a que la velocidad de la reacción de la cal en el suelo depende de la superficie del material en contacto con el suelo. Mientras más fino es el material tiene más superficie de contacto y reacciona más rápido.

Materiales como el óxido de calcio y el hidróxido de calcio son polvos finos por naturaleza y no tienen problema de tamaño de partícula al aplicarse al suelo. Cuando se usa calcita o dolomita el problema es completamente diferente.

Cuando se utiliza calcita o dolomita es necesario asegurarse de que el material sea molido a un tamaño de partícula adecuado. Las partículas de cal gruesas reaccionan más lentamente mientras que las partículas finas reaccionan más rápidamente y en forma completa. El costo de la cal aumenta con

el grado de fineza de la molienda. Lo ideal es utilizar un material que requiera un mínimo de molido y que a la vez tenga una cantidad suficiente de material fino que permita un cambio rápido en el pH. El mejor tamaño de partícula es aquél que pasa una malla mayor a 60 mesh.

APLICACION DE LA CAL

Las reacciones de neutralización de la cal exigen que el material se solubilice previamente, lo que determina que se debe aplicar la cal en un suelo húmedo. Si no existe humedad en el suelo las reacciones de neutralización no se producen.

Como se indicó anteriormente, la cal se mueve muy poco en el suelo debido a que el ion CO_3^{2-} se disipa como CO_2 después de las reacciones de hidrólisis y los efectos benéficos de la cal ocurren solamente en la zona de aplicación. Para que la cal sea efectiva es necesario incorporar y mezclar completamente el material en la capa arable.

En algunos sistemas de cultivo como los pastos y cultivos perennes, la incorporación completa solamente se puede hacer al inicio del cultivo. Una vez que el cultivo está establecido solamente se puede aplicar cal a la superficie, en ciertos casos con limitada incorporación, esperando un efecto muy parcial del encalado.

En el caso de cultivos perennes establecidos como el cafeto y el banano por ejemplo, la aplicación de cal superficial, en algunos casos con ligera incorporación, deberá hacerse solamente en la banda o zona de fertilización, antes del inicio de las lluvias para que los efectos del encalado se vean en las primeras brotaciones. La acidificación ocurre en la banda o corona de fertilización y la aplicación de la cal debe hacerse solamente en esa zona. En estos casos la aplicación superficial de cal eleva el pH en una profundidad restringida en el perfil del suelo (5-10 cm) que en ocasiones coincide con la zona donde se encuentra la mayor actividad radicular. Si existen problemas de acidez a mayor profundidad, éstos no se pueden resolver con aplicación de cal y se debe recurrir a otros métodos de control de acidez.

DETERMINACION DE LOS REQUERIMIENTOS DE CAL

Aun cuando el pH es un excelente indicador de la acidez, este parámetro no determina el requerimiento o cantidad de cal necesaria para llegar a determinado rango de pH en el sistema de produc-

ción que se está utilizando. Cuando se mide el pH solamente se determina la acidez activa pero para determinar los requerimientos de cal es también necesario considerar la acidez potencial retenida en los coloides minerales y orgánicos del suelo.

Los suelos dominados por minerales arcillosos de tipo 2:1 (montmorillonita, vermiculita, illita) que predominan en las zonas templadas del mundo, pero que también están presentes en zonas tropicales y subtropicales, se comportan de forma diferente de los típicos suelos tropicales rojos (Ultisoles y Oxisoles dominados por óxidos e hidróxidos de Fe y Al y caolinita) y de los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles). Estas importantes diferencias determinan que método debe utilizarse para evaluar los requerimientos de cal. Como se discutió en el capítulo anterior, en el Ecuador se encuentran presentes todas estas clases de suelos.

Requerimientos de cal en suelos dominados por arcillas de tipo 2:1

En los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1, la reducción en saturación de bases (pérdida de K, Ca y Mg) desarrolla acidez. Este incremento en acidez (reducción del pH) conduce a la ruptura de la estructura de los cristales arcillosos y a la liberación del Al estructural. Este Al ocupa los sitios de intercambio dejados por las bases desplazadas. Estos suelos, por tener arcillas de superficies de baja reactividad pueden fácilmente encalarse hasta llegar a pH 7.0, valor alrededor del cual se obtienen los mejores rendimientos de los cultivos. El incremento de pH logrado con el encalado incrementa poco o nada la CIC del suelo (suelos de carga permanente).

Un método común para determinar las necesidades de cal en suelos de carga permanente es utilizando soluciones tampón. La solución tampón más popular es la SMP buffer (Schoemaker, Mclean y Pratt) desarrollada para suelos ácidos de Ohio, E.U. Esta solución está compuesta de p-nitrofenol, trietanolamina, cromato de potasio, acetato de calcio y cloruro de calcio todo ajustado a pH 7.5. Los valores de pH de equilibrio de la suspensión suelo - agua - solución tampón en una relación 5:5:10, de varias muestras de suelo, se correlacionan con la cantidad de cal necesaria para elevar el pH a un valor de 6.8 determinada por el método de incubación con CaCO_3 , de las mismas muestras de suelo. De este modo se obtiene una curva de calibración con cuyos datos se puede construir una tabla de recomendación que determina las cantidades de cal

Tabla 2. Cantidad de cal a añadirse de acuerdo al cambio de pH de la suspensión suelo-solución buferizada (método SMP) y el pH al cual se requiere llegar (Fernandes de Sequeira, et al., 1987).

Indice SMP	----- pH en agua a obtenerse -----		
	5.5	6.0	6.5
	----- cal t/ha -----		
4.4	15.0	21.0	29.0
4.5	12.5	17.3	24.0
4.6	10.9	15.1	20.0
4.7	9.6	13.3	17.5
4.8	8.5	11.9	15.7
4.9	7.7	10.7	14.2
5.0	6.9	9.7	12.9
5.1	6.2	8.8	11.7
5.2	5.5	8.0	10.6
5.3	4.9	7.2	9.6
5.4	4.4	6.5	8.7
5.5	3.8	5.8	7.9
5.6	3.3	5.1	7.0
5.7	2.8	4.5	6.2
5.8	2.3	3.9	5.5
5.9	1.9	3.3	4.8
6.0	1.4	2.8	4.1
6.1	1.0	2.2	3.4
6.2	0.6	1.7	2.7
6.3	0.2	1.2	2.1
6.4	0.0	0.6	1.5
6.5	0.0	0.2	0.7
6.6	0.0	0.0	0.0

necesaria para lograr determinado pH. Un ejemplo se presenta en la Tabla 2.

En suelos de carga permanente estos métodos funcionan satisfactoriamente y son recomendables para suelos ácidos dominados por arcillas de tipo 2:1 en Ecuador como ciertos suelos de Azuay y Loja por ejemplo. En suelos ácidos de carga variable (Oxisoles, Ultisoles y Andisoles) esta metodología recomienda cantidades muy altas de cal que no son necesarias. A continuación se discuten métodos más convenientes para determinar los requerimientos de cal en suelos de carga variable.

Requerimientos de cal en Ultisoles y Oxisoles

En suelos tropicales viejos los métodos descritos anteriormente para determinar los requerimientos de cal no funcionan satisfactoriamente. El caso de los típicos suelos tropicales rojos (Ultisoles y Oxisoles) es diferente. Los minerales arcillosos de estos suelos, que han sufrido ya un proceso severo

de meteorización, son estables hasta valores de pH tan bajos como 5.0. En esta forma el Al se encuentra fijo en la partícula de arcilla y no amenaza el crecimiento de la planta hasta que el pH del suelo llega a valores donde los óxidos, hidróxidos y caolinita se disuelven y liberan Al a la solución del suelo. Generalmente esto ocurre a pH's entre 5.0 a 5.3. Cuando esto ocurre es aconsejable elevar el pH a valores de alrededor de 5.5 lo que permite la precipitación del Al e incrementa apreciablemente la CIC (suelos de carga variable) como se presenta en la Tabla 3. Este incremento en pH es suficiente para el adecuado crecimiento y rendimiento de los cultivos (Tabla 4).

Siguiendo este concepto, se puede predecir los requerimientos de cal para la mayoría de los suelos tropicales aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{CaCO}_3 \text{ equivalente (t/ha)} = \text{Factor} \times \text{cmol Al/kg de suelo} \quad (15)$$

El factor utilizado puede ser 1.5 o 2.0 de acuerdo con las características del cultivo y el tipo de suelo. El valor del factor puede ser modificado y afinado de acuerdo a la experiencia del técnico trabajando en una área específica.

El principal objetivo de este método es el utilizar solamente la cal necesaria para neutralizar todo el Al y eliminar su efecto tóxico. Este método de determinación de los requerimientos de cal es muy difundido en áreas tropicales de suelos rojos pero tiene como principal desventaja el hecho de que la neutralización del Mn se produce a 0.5 unidades de pH por encima de aquel necesario para la neutralización de Al. Cuando los suelos presentan también problemas de toxicidad de Mn se debe tomar en cuenta este factor en la determinación de los requerimientos de cal.

Por otro lado, existen cultivos tolerantes al Al y que pueden crecer y producir satisfactoriamente a moderadas tasas de saturación de Al en la fase de intercambio. Como en este caso no es necesario precipitar todo el Al se pueden utilizar cantidades aun menores de cal que solamente reducirán la saturación de Al a los valores requeridos.

Para esto se utiliza un método que da mucha importancia a la saturación de bases del suelo. Si bien se ha determinado que la saturación de bases no ejerce marcada influencia en el rendimiento en suelos dominados por esmectitas (suelos de carga permanente) de alta CIC, este parámetro es muy importante en suelos viejos altamente meteorizados (Ultisoles y Oxisoles) de baja CIC que tienen

Tabla 3. Efecto del encalado en los parámetros químicos en un Ultisol rojo de Panamá*.

Tratamiento	pH	Ca	Mg	K	Al	CIC efectiva
		----- cmol (+)/kg de suelo** -----				
Sin cal	4.9	1.79	1.12	0.11	2.15	5.18
Cal (4 t/ha)	5.8	7.90	6.73	0.14	0.09	14.85

* Adaptado de Name (1992).

** cmol (+)/kg suelo = meq/100 g de suelo.

Tabla 4. Efecto del encalado en el rendimiento de varios cultivos y en el pH del suelo en Oxisoles de Brasil.

Soya			Trigo			Maíz	
CaCO ₃ t/ha	pH	Rend. kg/ha	CaCO ₃ t/ha	pH	Rend. kg/ha	pH	Rend. kg/ha
0	4.6	1943	0	4.7	1324	3.9	1150
3.5	4.9	2514	3.5	5.0	2363	4.5	4090
			7.0	5.2	3031	4.7	4420
						5.3	5340

Adaptado de Kamprat (1990).

muy poco contenido de Ca y Mg. En estos suelos el uso de la cal no solo es una enmienda sino también una fuente de estos nutrientes. En este tipo de suelos, la investigación ha demostrado, dentro de ciertos límites, que mientras más alta sea la saturación de bases mayor es la fertilidad del suelo y mayores son los rendimientos. De estos conceptos surgió el método para determinar los requerimientos de cal tomando en cuenta la saturación de bases a la cual se desea llevar al suelo con la aplicación de la enmienda. En el caso del café la experiencia Brasileña demuestra que se debe llevar al suelo a una saturación de bases de 60% para rendimiento óptimo. En otras palabras el café puede crecer satisfactoriamente hasta con una saturación de 40% de Al en la fase de intercambio.

De acuerdo con estos criterios los requerimientos de cal se pueden calcular utilizando la siguiente ecuación:

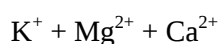
$$R.C. (t/ha) = (CIC (SB2-SB1))/100 \quad (16)$$

de donde:

CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico.

CICE = $(H^+ + Al^{3+} + K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+})$ en cmoles (+)/kg de suelo.

SB1 = Porcentaje de Saturación de Bases.



$$SB1 = \frac{\text{CICE}}{\text{CICE}} * 100$$

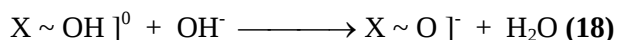
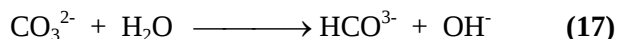
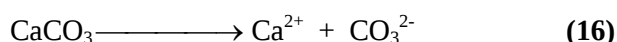
SB2 = Porcentaje de Saturación de Bases a la cual se desea llegar.

Requerimientos de cal en Andisoles

Los Andisoles (suelos derivados de ceniza volcánica) tienen una alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) y una moderada CIC y estos factores hacen que la determinación de los requerimientos de cal en estos suelos sea más complicada. La intensidad de la capacidad tampón varía de un sitio a otro de acuerdo a los factores que controlan la meteorización de la ceniza como la altitud, precipitación, temperatura y edad del material. Por esta razón no existe una regla simple para evaluar los requerimientos de cal en estos suelos. El uso del criterio del Al intercambiable o la saturación de bases en ciertos casos subestima la necesidad de cal como se observa en los datos presentados en la Tabla 5.

La alta capacidad tampón de los Andisoles se debe a que las arcillas resultantes de la meteorización de las cenizas volcánicas (alofana, imogolita y complejos humus-Al) tienen una superficie muy reactiva. En este caso los OH⁻ producidos por hidrólisis del ion CO₃ crean carga en la superficie de las arcillas por deprotonización (pérdida de H⁺) y con-

secuentemente no se incrementan el pH de la solución del suelo, pero incrementan la CIC (carga variable). Estas reacciones se describen a continuación:



Esta resistencia al cambio de pH de los suelos de carga variable obligaría a utilizar cantidades muy altas de cal para llegar a pH 7.0. Obviamente esto no es necesario y solamente es conveniente el elevar el pH hasta valores un poco más arriba de lo necesario para precipitar el Al^{3+} (5.3-5.5). En Andisoles, la cantidad de cal necesaria para precipitar el Al o la magnitud de la capacidad tampón, varía con la edad y el estado de meteorización de la ceniza volcánica y por esta razón es necesario conducir experimentos simples que determinen exactamente los requerimientos de cal de un sitio específico. En el caso del ejemplo de la Tabla 5, la capacidad tampón del suelo es muy alta y es necesario aplicar 6 t/ha de cal para precipitar el Al^{3+} y producir buenos rendimientos de cultivos susceptibles al Al^{3+} . En otros andisoles la capacidad tampón es menor y en consecuencia se debe aplicar menor cantidad de cal.

BENEFICIOS DEL ENCALADO

Toxicidad de Aluminio

El mayor efecto benéfico del encalado de suelos ácidos es la reducción en la solubilidad del Al y Mn. Estos dos elementos, aun cuando estén presen-

tes en bajas concentraciones, son tóxicos para la mayoría de los cultivos. El exceso de Al interfiere la división celular en las raíces de la planta y esta es la razón por la cual el sistema radicular de las plantas creciendo en suelos ácidos es atrofiado y pobremente desarrollado. La presencia de altas concentraciones de Al en la solución del suelo inhiben también la absorción de Ca y Mg por las plantas. Cuando se añade cal al suelo, el incremento en pH induce la precipitación del Al y Mn como compuestos insolubles removiéndolos de esta forma de la solución del suelo.

Disponibilidad de Fósforo

La relación entre el pH del suelo y el tipo de arcilla es importante para diferenciar los mecanismos envueltos en la disponibilidad del P.

Aquellos suelos dominados por arcillas de tipo 2:1 (esmectitas) no tienen una superficie reactiva y retienen modestas cantidades de P en la superficie. La mayor causa de pérdida de disponibilidad de P (fijación) en estos suelos se debe a las reacciones del P con el Al y Fe. La reducción en pH (incremento de acidez) permite la rompimiento de la estructura de los minerales arcillosos y en consecuencia libera Al y Fe. El P aplicado al suelo reacciona con estos elementos y se precipita como fosfatos insolubles de Al y Fe haciendo que el P sea menos disponible. En este caso, las formas más solubles o disponibles de P existen dentro de un rango de pH que va de 6.0 a 7.0 y un adecuado programa de encalado es esencial para reducir la fijación de P. La Figura 2 ilustra el efecto del pH del suelo en la fijación de P en los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1 (Figura 2).

Tabla 5. Efecto de la aplicación en cal en las propiedades químicas y el rendimiento de varios cultivos en un Andisol de Ecuador.

CaCO ₃	pH	Al	K	Ca	Mg	CIC*	----- Rendimientos -----		
t/ha		----- cmoles (+) kg -----					Haba	Cebada	Avena
							----- t/ha -----		
0	5.0	2.1	0.31	2.54	0.36	6.0	13.9	2.2	3.6
1.5	5.1	1.5	0.29	2.58	0.36	6.2	12.8	3.0	4.4
3.0	5.2	1.6	0.29	3.30	0.44	6.6	17.1	2.9	4.3
4.5	5.2	1.5	0.31	4.67	0.48	7.2	18.9	3.7	4.4
6.0	5.3	0.6	0.24	4.67	0.45	7.2	19.2	3.9	4.7
9.0	5.4	0.4	0.28	4.60	0.46	7.4	21.5	3.9	5.2
12.0	5.4	0.2	0.30	5.59	0.55	8.4	21.6	4.1	4.8
15.0	5.8	0.1	0.30	8.60	0.80	10.7	21.0	4.3	4.7
* CIC medida con una sal indiferente									

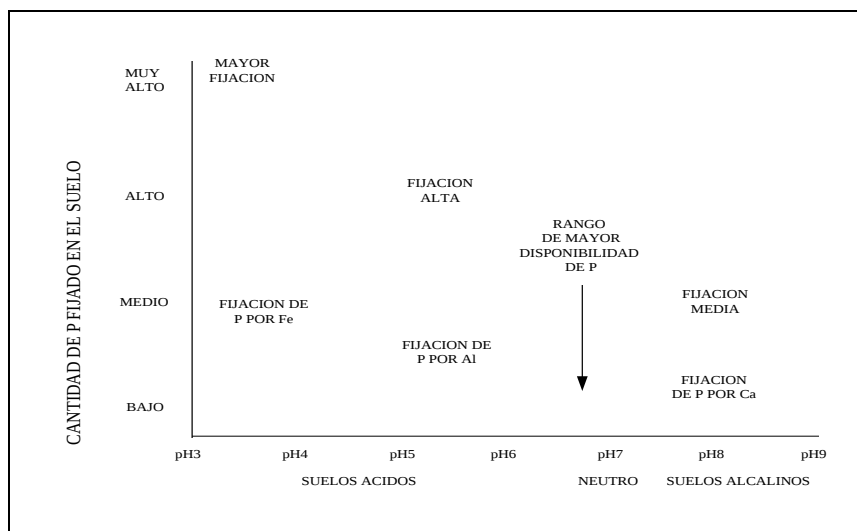


Figura 2. Efecto del pH del suelo en la fijación de P en los suelos dominados por arcillas de tipo 2 :1.

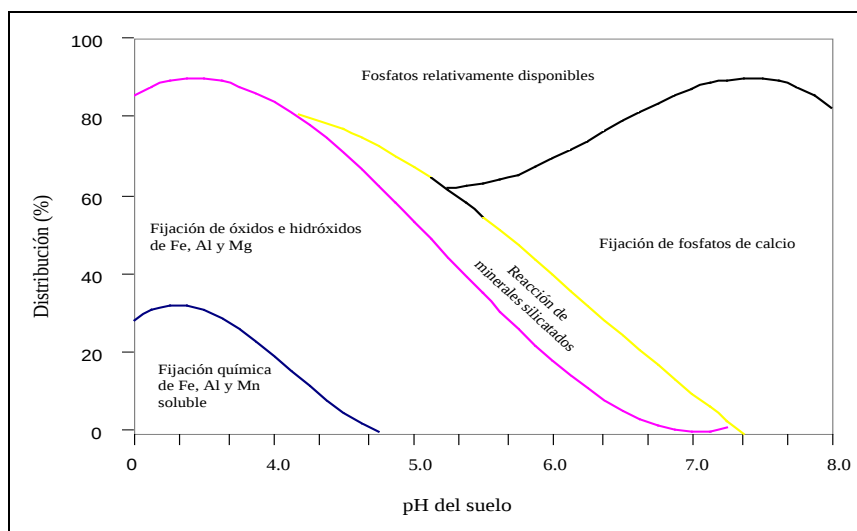


Figura 3. Distribución de la fijación de P de acuerdo al tipo de arcilla y al pH del suelo (Brady, 1976).

Tabla 6. Respuesta a la aplicación de P en suelos de diferente capacidad de fijación.

Soya Ultisol (Venezuela)		Arroz seco Ultisol (Panamá)		Arroz seco Oxisol (Brasil)		Papas Andisol (Ecuador)	
P ₂ O ₅	Rend.	P ₂ O ₅	Rend.	P ₂ O ₅	Rend.	P ₂ O ₅	Rend.
kg/ha							
0	112	0	1035	0	1041	0	6000
75	1964	40	2316	50	3746	150	32600
150	2543	80	3019	100	4326	300	39800
		120	3668	150	4811	450	42500

Los mecanismos de fijación en los suelos altamente meteorizados de los trópicos (Ultisoles y Oxisoles dominados por óxidos e hidróxidos de Al y Fe y caolinita) y los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles) son diferentes. La capacidad de fijación en la mayoría de estos suelos está relacionada con la alta reactividad y afinidad por P de las superficies de las arcillas presentes en estos suelos. Este proceso retiene apreciable cantidad de P en un rango de pH de 5.0 a 7.0 (Figura 3).

El efecto del encalado en suelos tropicales generalmente lleva a confusión con respecto a la disponibilidad de P. La aplicación de cal en suelos tropicales corrige la toxicidad de Al y la deficiencia de Ca y la corrección de estos factores permite un incremento de la absorción de P aun cuando el encalado tiene muy poco efecto en la disponibilidad y fijación de P principalmente a pH's mayores de 5.0-5.5 donde la retención de P ocurre principalmente por reacciones en las superficies de las arcillas que tienen gran afinidad por este elemento (quemadsorción). En la mayoría de los casos, una vez que se han controlado otras limitaciones del crecimiento, el efecto de la aplicación de cal en la reducción de la fijación de P es pequeño. Esta es la razón por la cual en suelos tropicales, independientemente del pH, son necesarias aplicaciones de apreciables cantidades de P para obtener buenos rendimientos. Ejemplos de la respuesta al P en Ultisoles, Oxisoles y Andisoles se presentan en la Tabla 6.

Fijación de Nitrógeno

En los suelos tropicales viejos el Al y Fe presentes en los minerales arcillosos son estables hasta pH's bajos. Cuando el pH del suelo llega a valores menores que 5.3 el Al y Fe son liberados a la solución del suelo y reaccionan rápidamente con el P

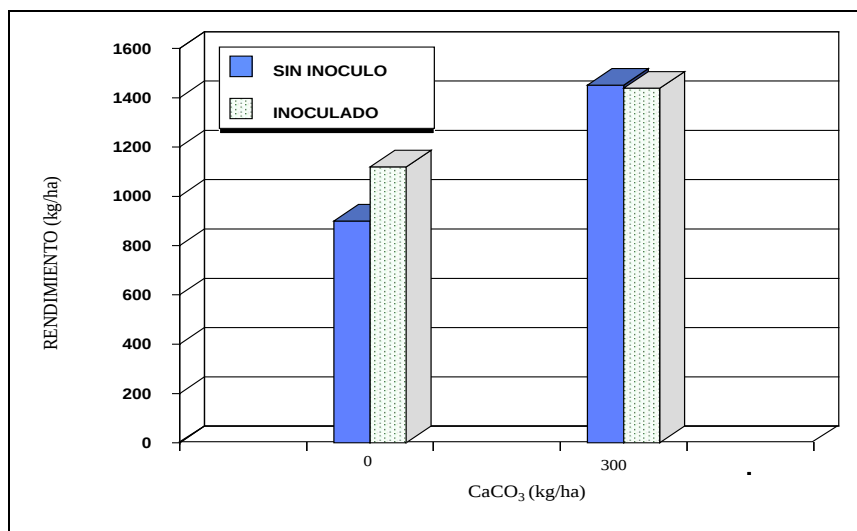


Figura 4. Efecto del encalado en el rendimiento de frijol con y sin previa inoculación en Ultisoles de Venezuela (Gutiérrez 1992).

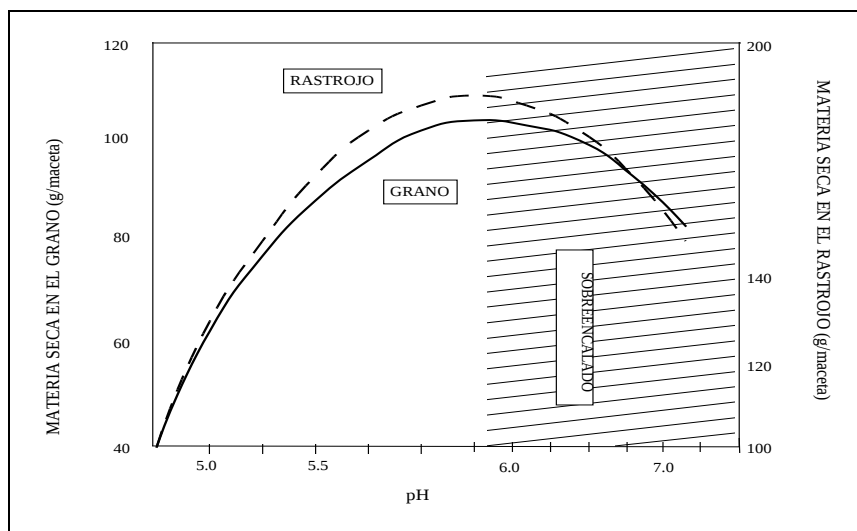


Figura 5. Efecto del sobreencalado en el rendimiento de maíz en Ultisol de Haway (Sánchez 1976).

para formar compuestos insolubles que se precipitan incrementando de esta manera el proceso total de fijación.

Tabla 7. Efecto de la aplicación de cal en la población microbiana de suelos ácidos del Cerrado, Brasil (Malavolta, 1991).

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Suelo 4
---- millones de bacterias/g de suelo ----				
Sin cal	20	100	890	340
Con cal	480	190	1000	1290

Adaptado de Malavolta (1991).

En general, la acidez del suelo restringe la actividad de la mayoría de los microorganismos del suelo. El encalado mejora apreciablemente las condiciones del suelo y permite un adecuado desenvolvimiento de la actividad microbiana como se observa en el ejemplo del efecto del encalado en la población microbiana de suelos ácidos del Cerrado Brasileño presentado en la Tabla 7.

Dentro de la actividad microbiana, el proceso de fijación de N atmosférico es favorecido por el encalado. La actividad de las especies de rizobium en las leguminosas se restringe a pH's bajos. El encalado permite un mayor crecimiento de las leguminosas debido a que éstas pueden fijar una cantidad mayor de N gracias a las adecuadas condiciones para el desarrollo de la bacteria como se ilustra en el ejemplo de la Figura 4.

PROBLEMAS DE SOBRE ENCALADO

Por muchos años se consideró que el pH óptimo para la producción de cultivos estaba entre 6.5 y 7.0. Esto es cierto en Mollisoles, Vertisoles, Alfisoles (suelos dominados por esmectitas). Investigación ha demostrado que el encalar Oxisoles, Ultisoles y Andisoles de los trópicos a pH mayor de 6.0 es no solamente innecesario sino también riesgoso. El sobreencalado a valores de pH cercanos a 7.0 puede deprimir seriamente el rendimiento, causar deterioro de la estructura en inducir deficiencias de Zn, B, y Mn. Un ejemplo de sobreencalado en un Ultisol de Hawai se presenta en la Figura 5.

El encalado de los suelos tropicales debe ser suficiente para solamente neutralizar la mayoría del aluminio intercambiable lo cual lleva el pH a valores de 5.5 - 6.0.

USO DE YESO AGRICOLA COMO ENMIENDA

Es interesante el uso del yeso (CaSO_4) agrícola como enmienda en suelos ácidos. En realidad el yeso no cambia la acidez del suelo directamente a tal punto que las aplicaciones de yeso al suelo prácticamente no cambian el pH. Los beneficios de la aplicación de yeso en suelos ácidos se derivan de su efecto como mejorador del ambiente radicular, especialmente en la presencia de subsuelos fuertemente ácidos.

Cuando se encala el suelo, la acción de la cal se confina a la sección del suelo donde se incorporó el material. Si el suelo es ácido hasta cierta profundidad en el perfil, más allá de la capa arable, las capas inferiores continuarán ácidas porque no se benefician del encalado. Esto ocurre porque el ion CO_3^{2-} se disipa como CO_2 en la zona de aplicación. De esta forma tampoco el Ca^{2+} puede moverse a través del perfil.

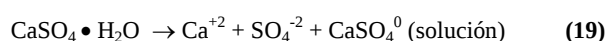
El Ca^{2+} tiene muchas funciones en la planta y por esta razón se necesitan niveles relativamente altos de este nutriente en el suelo para asegurar el crecimiento de las raíces. La absorción iónica de nutrientes de la solución del suelo por las raíces depende de la presencia de Ca^{2+} , que mantiene la integridad funcional de membrana citoplasmática lo que garantiza el proceso metabólico de absorción de nutrientes. Como ya se ha discutido anteriormente, la presencia de Al^{3+} en la solución del suelo causa agudos problemas al cultivo. El Al^{3+} dificulta la división y crecimiento celular lo que inhibe el desarrollo de las raíces, promoviendo de esta forma raíces cortas y gruesas que no pueden absorber de la solución del suelo iones como H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} o NO_3^- .

Condiciones de bajo contenido de Ca^{2+} y alto contenido de Al^{3+} generalmente se presentan en suelos tropicales ácidos, y en muchos casos, estas condiciones prevalecen en el subsuelo donde son difíciles de corregir con aplicaciones de cal. La utilización de yeso promueve el desarrollo de condiciones favorables para el crecimiento vigoroso del sistema radicular en capas subsuperficiales del suelo. Un sistema radicular que crece vigorosamente a profundidad aprovecha mejor el agua dis-

ponible ya que las capas inferiores del suelo conservan mejor la humedad. De esta forma el cultivo resiste mejor las épocas secas. Además, un sistema radicular vigoroso y profundo explora mejor el perfil del suelo aprovechando mejor los nutrientes. Todo esto se refleja por supuesto en un mejor rendimiento del cultivo.

Las reacciones químicas que se producen luego de la adición de yeso al suelo, y que conducen a la creación de condiciones favorables para el crecimiento radicular, se resumen a continuación:

1.- Disolución y disociación del CaSO_4 en la superficie del suelo



2.- Reacciones de intercambio y formación de pares iónicos

Como se observa la disociación produce Ca^{+2} y SO_4^{-2} como iones en la solución, pero además queda sin disociarse CaSO_4^0 que se puede mover a través del perfil a capas inferiores. El Ca^{+2} puede reemplazar cationes en la fase de intercambio y liberar a la solución del suelo Al^{+3} , Mg^{+2} , K^+ , etc. como se describe a continuación:

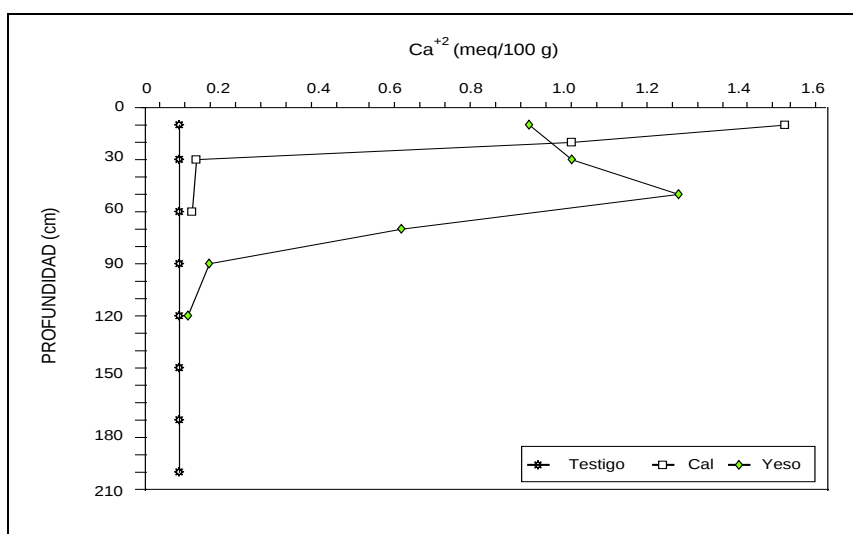
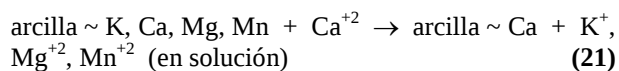
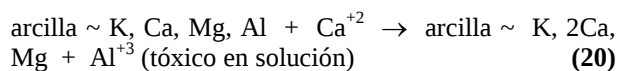


Figura 6. Efecto de la aplicación de cal y yeso en el movimiento de Ca^{+2} en el perfil del suelo.

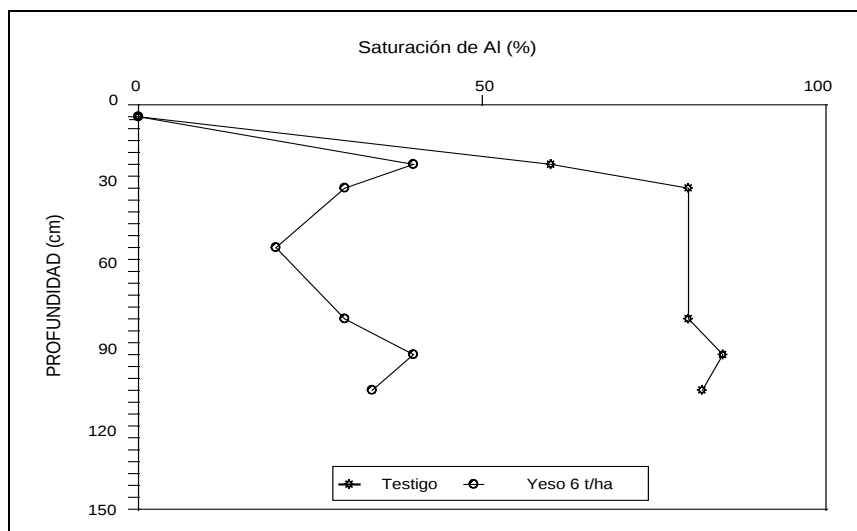


Figura 7. Efecto de la aplicación de cal y yeso en el contenido de Al^{+3} en el perfil del suelo.

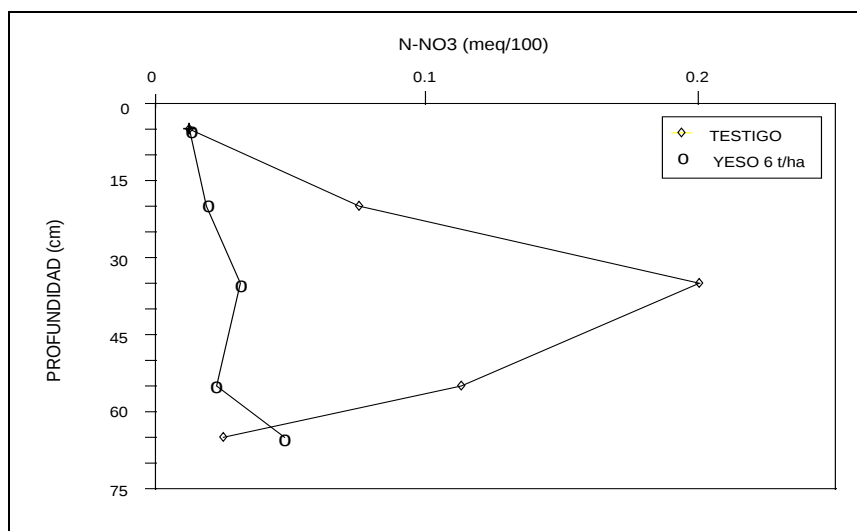
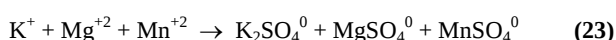
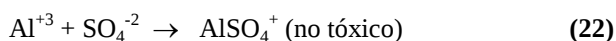


Figura 8. Efecto de la aplicación de cal y yeso en la absorción NO_3^- en el perfil del suelo.

3.- Formación de pares iónicos

Los cationes resultantes de estas reacciones darán lugar a la formación de pares iónicos con el SO_4^{-2} de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



4.- Lixiviación y disociación a profundidad

Los pares iónicos formados se mueven a capas más profundas del suelo donde pasan nuevamente por las reacciones de intercambio catiónico y por la

formación de pares iónicos. Esto permite el enriquecimiento con cationes de las capas inferiores, pero fundamentalmente elimina el Al^{+3} al forma $AlSO_4^+$.

Todas estas reacciones mejoran las condiciones químicas del suelo y promueven un mejor ambiente radicular en capas subsuperficiales lográndose que la planta tenga un mejor crecimiento y rendimiento gracias a una mejor utilización de agua y nutrientes. Estas condiciones no se logran con la aplicación de cal como se ilustra en las Figuras 6, 7 y 8.

Cantidad de yeso a utilizarse

El yeso tiene una solubilidad de 2.5 g/litro pero diversos factores pueden alterar ese valor en el suelo, especialmente la presencia de cationes y la formación de pares iónicos. La constante de solubilidad del yeso (K_s) es igual a 2.44×10^{-5} .

No es necesario incorporar el yeso debido a su solubilidad y a la facilidad como desciende por el perfil del suelo. Es suficiente con aplicar al voleo en el suelo preparado para la nueva siembra o en la superficie del suelo donde crecen cultivos perennes.

No se dispone de criterios seguros para recomendar la aplicación de yeso por falta de información experimental en diversos suelos y por la complejidad de las reacciones químicas que el yeso desata en el suelo.

Sin embargo, se han desarrollado diversos criterios que se ajustan principalmente a suelos tropicales viejos (Ultisoles y Oxisoles). Estos criterios son:

$$\text{Yeso (t/ha)} = (0.4 \times \text{CICE} - \text{meq Ca/100 g}) \times 2.5 \quad (24)$$

$$\text{Yeso (t/ha)} = (0.2 \times \text{CICE} - \text{meq Al/100 g}) \times 2.5 \quad (25)$$

Por otro lado, se considera que para elevar el Ca intercambiable en el suelo en 1 meq/100 g o para disminuir el Al en la misma cantidad se debe aplicar 2.5 t/ha de yeso.

De igual manera, la textura parece ser una buena base para determinar la cantidad yeso a aplicarse. En suelos muy ácidos se sugiere utilizar 2, 4 y 6 t/ha de yeso en suelos arenosos, francos y arcillosos respectivamente.

Para concluir, es necesario indicar que se debe ser prudente con la aplicación de yeso al suelo por el potencial peligro de lixiviar cationes a través de la formación de pares iónicos.

BIBLIOGRAFIA

- Brady, N. 1976. Naturaleza y propiedades de los suelos. Editorial Hispano América. México.
- Espinosa, J. 1987. Efecto del encalado en las propiedades químicas del suelos ecuatorianos. Memorias del Primer Congreso Nacional de Ciencias de la Comunidad Científica Ecuatoriana. Quito, Ecuador.
- Fox, R. L. 1980. Soil with variable charge: Agonomic and fertility aspects. In theng, G. (ed). Soils with variable charge. Palmerston North, New Zeland Society of Soil Science.
- Fernandes de Sequeira, et al., 1987. Recomendacoes de adubacao e calagem para os estados do Rio Grande do sul e Santa Catarina. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. Passo Fundo, Brasil.
- Guillman, G. P. 1979. A proposed method for the measurement of exchange properties on highly weathered soils. Aust. J. Soil Res. 17:129-139.
- Guilman, G. P., and R. L. Fox. 1980. Increases in the cation exchange capacity of variable charge soils following superphosphate applications. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:934-938
- Guillman, G. P., and G. Uehara. 1980. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: 2. Experimental. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:252-255.
- Gutiérrez, R. 1992. fertilización biológica y biotecnología. Memorias del seminario "Fertilización Balanceada de Cultivos". PALMAVEN-INPOFOS. Maracay, Venezuela.
- Kamprat, E. 1990. Crop response to lime in soils of the tropics. In F. Adams (ed.) Soil acidity and liming. Agronomy Series No 12. American Society of Agronomy.
- Malavolta, E. 1992. Reacción del suelo y el café. Memorias del seminario "Fertilización y Nutrición del Café". ANACAFE-INPOFOS. Guatemala.
- Malavolta, E. 1992. O gesso agrícola no ambiente e na nutricao da planta - perguntas e respostas. Memorias del II Seminario Sobre o Uso do Gesso na Agricultura, Instituto Brasileiro do Fosfato. p 41-66.
- Malavolta, E., A. Lopes, y L. Guilherme. 1991. Fertilizantes, correctivos y productividad. Memorias de simposio "El Suelo y la Productividad". Itaguai, Río de Janeiro.
- Name, B. 1992. Dinámica de fósforo en un Ultisol de Panamá. Reporte del ciclo 1991-1992. Instituto de Investigación Agropecuarias de Panamá. Divisa, Panamá.
- Osaki, F. 1991. Calagem e adubacao. Campinas, SP: Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola.
- Parfitt, R. L. 1980. Chemical properties of variable charge soils. In: C. Theng. (ed). Soils with variable charge. Palmerston North, New Zeland Society of Soil Science.
- Parfitt, R. L., and T. Henmi. 1980. Structure of some allophanes from New Zeland. Clays Clay Min. 28:285-294.
- Raij, B. Von. 1991. Fertilidade do solo e adubacao. Editora agronomica Ceres Ltda. Sao Paulo, Brasil.
- Raij, B. Von. 1992. Reacciones de gesso em solos ácidos. Memorias del II Seminario Sobre o Uso do Gesso na Agricultura, Instituto Brasileiro do Fosfato. p 105-119.
- Schoemaker, H.E., E. O. Mclean, and P.F. Pratt. 1961. Buffer methods for determining lime requieriments of soils with appreciable amounts of exchangeable aluminum. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25:247-277.
- Uehara, G., and G. Gillman. 1981. The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder, Colorado.
- Uehara, G., and J. Keng. 1975. Management implications of soil mineralogy in La America. In: E. Bornemizsa and A. Alvarado (eds.). Soil Management in Tropical America. N.C. State Univ., Raleigh.