

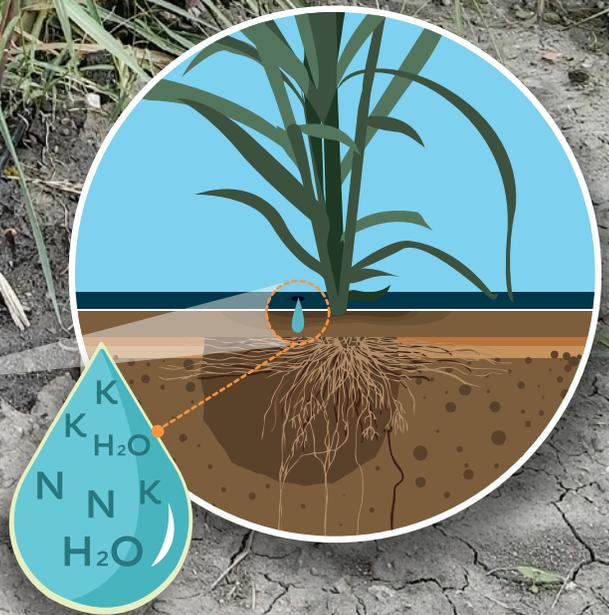


cenicaña

Centro de Investigación de la
Caña de Azúcar de Colombia

RIEGO POR GOTEO

EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR



LOS AUTORES

Armando Campos Rivera

Ingeniero agrícola con estudios de posgrado en Recursos Hidráulicos. Consultor, asesor de empresas e investigador. Docente de dedicación exclusiva en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, durante tres décadas; recibió cinco distinciones de Docente Excepcional de parte del Consejo Superior Universitario por su labor en las áreas de Climatología, Riegos e Hidráulica en la Facultad de Agronomía y un reconocimiento a la labor de parte del Consejo Directivo de la Facultad de Agronomía por su papel destacado en la creación de los programas doctorales en Ciencias Agrarias. En esta Facultad fue director de la carrera de Ingeniería Agronómica, director del Departamento de Agua y Suelos, vicedecano académico y decano encargado. Ha dirigido más de medio centenar de trabajos grado y cinco tesis de maestría en temas de riego, fertirriego y relación agua-suelo-plantas y participa con frecuencia en eventos científicos acerca de los temas de su dominio. Durante diez años (2007-2017) estuvo vinculado a Cenicaña como asesor e investigador del Programa de Agronomía en manejo de aguas: lideró el proyecto de investigación y desarrollo tecnológico del sistema de riego con caudal reducido en caña de azúcar y la investigación reciente en riego por goteo.

Doris Micaela Cruz Bermúdez

Ingeniera agrícola egresada de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Trabajó en el Programa Red de Seguridad Alimentaria para Pequeños Productores de las Localidades Rurales de Bogotá D.C. En 2006 se vinculó a Cenicaña en el área de manejo de aguas y suelos del Programa de Agronomía. Es colaboradora principal en los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico de los sistemas de riego con caudal reducido y riego por goteo, a través de los cuales ha contribuido a precisar las condiciones de uso de estos sistemas y al desarrollo del fertirriego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca. Coautora de cinco artículos técnicos presentados en eventos nacionales e internacionales; tres artículos divulgativos, entre ellos *Riego con caudal reducido: una opción para el piedemonte* publicado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en el libro *Ciencia y Tecnología para la Competitividad del Sector Agropecuario 2002-2010*; y dos libros, donde comparte autoría con Armando Campos Rivera: *Riego con caudal reducido en cultivos de caña de azúcar - Guía metodológica y Riego por goteo en el cultivo de la caña de azúcar*.



cenicaña

Centro de Investigación de la
Caña de Azúcar de Colombia

RIEGO POR GOTEÓ

EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Armando Campos Rivera

Doris Micaela Cruz Bermúdez

Campos Rivera, Armando

Riego por goteo en el cultivo de la caña de azúcar / Armando Campos Rivera y Doris Micaela Cruz Bermúdez – Cali: Centro de Investigación de La Caña de Azúcar de Colombia, 2018.

180 p.; 24 cm.

Incluye referencias bibliográficas

ISBN: 978-958-8449-21-0

1. Caña de azúcar. 2. Agua. 3. Riego por goteo. 4. Medición. 5. Microirrigación. 6. Balance hídrico del suelo. 7. Sistemas de riego.

I. Cruz Bermúdez, Doris Micaela

II. Título.

633.6 CDD 23 ed.

C198

Cenicaña – Biblioteca Guillermo Ramos Núñez

© 2018 por Cenicaña®

ISBN: 978-958-8449-21-0

Dirección postal: Calle 58 Norte 3BN-110. Cali, Colombia.

Estación Experimental: vía Cali-Florida km 26

San Antonio de los Caballeros, Valle del Cauca.

www.cenicana.org

buzon@cenicana.org

Producción editorial: Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología.

Coordinación editorial y edición de textos: Victoria Carrillo C.

Fotografías: Armando Campos R. y Doris Micaela Cruz B.

Diseño e ilustraciones: EL Bando Creativo

Impresión: Impresos Richard. Cali.

Las fotografías fueron realizadas en las Haciendas San Rafael, La Cabaña, El Medio, Granadillo, Lusitania, El Edén, Las Ceibas y Zabaletas y en las fincas de los siguientes ingenios:

La Cabaña: haciendas Vallecito y Acuario.

Manuelita: haciendas Santa Anita y La Cabaña.

Mayagüez: haciendas El Pindo y El Recreo.

Providencia: hacienda La Italia.

Agradecimientos



A Cenicaña y a su personal, en especial a los ingenieros Javier Carbonell, Fernando Muñoz, Miguel Ángel López y Camilo Isaacs, por el apoyo recibido en la producción de este libro. A los ingenieros Alejandro García, Giovanni Meléndez, Jairo Valencia, Mauricio Mendoza y Francisco Arbeláez, interlocutores en los ingenios Manuelita, Mayagüez, La Cabaña y Castilla, y a los productores de caña de azúcar Carlos Hernando Azcárate, Felipe Mejía, Enrique Villegas, Vicente Borrero y Fernando Hoyos, por su interés y sus contribuciones en el proceso de aprendizaje acerca del riego por goteo en las condiciones de cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca.



Contenido

	Página
Presentación	8
Introducción	9
Relaciones agua–suelo	13
Introducción	14
Relaciones de masa y volumen de los constituyentes del suelo.....	15
Relaciones de láminas.....	19
Retención de humedad del suelo.....	21
Tensión del agua en el suelo	24
Curvas de retención de humedad.....	25
Movimiento del agua en el suelo.....	27
Referencias.....	32
Símbolos y abreviaturas	33
Descripción del sistema de riego por goteo	35
Componentes de un sistema de riego por goteo	36
Introducción	38
Sistema de bombeo.....	39
Sistema de control.....	39
Sistema de filtrado.....	40
Sistema de inyección de fertilizantes (fertirriego).....	48
Red de tuberías	54
Goteros	55
Ventajas y desventajas del riego por goteo.....	60
Referencias.....	62
Símbolos y abreviaturas	62
Planificación de un sistema de riego por goteo	63
Introducción	64
Condiciones del entorno.....	65

	Página
Diseño agronómico.....	82
Alternativas de planificación del riego	88
Programación de riegos.....	89
Evaluación del riego	100
Mantenimiento del sistema	103
Referencias.....	106
Símbolos y abreviaturas	109
Diseño hidráulico del riego por goteo	113
Introducción	114
Relaciones entre presión, peso específico y altura.....	115
Tipos de tuberías	116
Ecuaciones para el cálculo de tuberías.....	117
Pérdidas de energía por aditamentos o localizadas.....	120
Pérdidas de energía en TSM.....	127
Diseño de las tuberías de conducción.....	130
El sector de riego.....	134
Secuencia general para el diseño hidráulico en un sistema de riego por goteo	144
Referencias.....	147
Símbolos y abreviaturas	147
Fertirrigación en el cultivo de caña de azúcar	149
Introducción	150
Análisis básicos	151
Tratamientos del agua en el riego por goteo	156
Necesidades de fertilización.....	159
Operación del fertirriego.....	170
Referencias.....	179
Símbolos y abreviaturas	180



Presentación

Cenicaña promueve la agricultura específica por sitio en la agroindustria sucro-energética del valle del río Cauca como estrategia para desarrollar el potencial genético de las variedades de caña de azúcar en los distintos ambientes de cultivo. El objetivo es aumentar la productividad en el campo y entregar una materia prima de óptima calidad a las fábricas. En este sentido, el riego y la fertilización son factores que exigen el máximo control de parte de los cañicultores e ingenios.

El riego por goteo se caracteriza por la aplicación frecuente y controlada de agua y nutrimentos en forma localizada, directamente en la zona radical de las plantas, gracias a lo cual es reconocido como el sistema más eficiente para elevar la productividad de los cultivos con menores gastos de agua y fertilizantes. En el valle del río Cauca se ha establecido el sistema de producción de caña de azúcar con riego por goteo en más de 4000 hectáreas y en la mayoría de los sitios ha aumentado la productividad; en ambientes de piedemonte se han conseguido incrementos en producción hasta del 40%.

El libro de *Riego por goteo en el cultivo de la caña de azúcar* incluye cinco capítulos de contenido técnico enriquecidos con ilustraciones y fotografías, en los cuales se presentan las relaciones agua-suelo, la descripción del sistema, la planificación, el diseño hidráulico y la fertirrigación. En cada uno se destaca el conocimiento acerca de las condiciones de operación del sistema, sus componentes, ventajas y limitaciones, asuntos que deben ser del dominio de quienes intervienen en el manejo de esta tecnología. Más que una solución de riego, el sistema de goteo debe ser visto como un sistema de producción de cultivos en condiciones altamente controladas y acorde con la agricultura específica por sitio.

Álvaro Amaya Estévez
Director general, Cenicaña



Introducción

De las 243,000 hectáreas cultivadas con caña de azúcar en el valle del río Cauca actualmente se riegan por goteo más de 4000 hectáreas. El proceso de adopción del sistema por parte de los ingenios y los cultivadores, apenas incipiente, ha sido acelerado; esto se explica por la preocupación cada vez más grande ante la escasez del recurso hídrico y por las restricciones impuestas por la autoridad ambiental para el acceso a las fuentes de agua superficiales y subterráneas en los períodos de bajas precipitaciones, que pueden estar asociadas o no a la influencia del fenómeno de El Niño.

Los excelentes resultados en productividad y rendimiento obtenidos en la mayoría de los sitios donde el riego por goteo ha sido establecido han reforzado el proceso de adopción. El sistema funciona suministrando agua y fertilizantes de manera oportuna, suficiente y uniforme; de acuerdo con las condiciones agroecológicas del cultivo se define el momento oportuno del riego y las cantidades por aplicar, y con un diseño basado en criterios hidráulicos se consigue alta uniformidad en la aplicación. En algunos casos se han dado experiencias sin éxito, fracasos y abandono del sistema, especialmente en sitios donde no se ha contado con una buena planificación ni con un diseño eficiente basado en las condiciones agroecológicas del lugar y los requerimientos de agua y fertilizantes del cultivo o cuando no se ha pasado por el proceso natural de aprendizaje sobre el funcionamiento del sistema y su manejo.





La planificación del sistema debe estar basada en las condiciones de clima, suelo y agua del lugar, de manera que se llegue a un cálculo realista de la demanda hídrica del cultivo y que se confrontará con la disponibilidad del recurso agua. Una ayuda valiosa para el sector agroindustrial de la caña de azúcar es el estudio detallado de suelos, de consulta obligatoria para los productores interesados en invertir en riego por goteo. El estudio muestra al nivel de suerte la distribución espacial de las diferentes consociaciones de suelo, sus características físicas y químicas y la descripción del perfil, lo que permite sacar conclusiones sobre la capacidad de retención de humedad, las necesidades de agua y la frecuencia con que debe ser regada cada consociación.

El análisis químico del suelo antes de la siembra permite establecer el nivel de fertilidad en el sitio de cultivo, los desequilibrios nutricionales presentes y la necesidad de correctivos y enmiendas en lo que se denomina fertilización de fondo, así como ayuda a orientar el plan de fertilización ajustado a la demanda del cultivo. Para el efecto Cenicaña ha entregado las curvas de extracción de nutrientes de las variedades CC 01-1940, CC 85-92, CC 93-4418 y CC 06-791 que deben tenerse en cuenta en las aplicaciones de fertirriego. El análisis foliar completo en muestras tomadas entre 5 y 7 meses de edad de las plantas indica el estado nutricional del cultivo en un momento en que el sistema de goteo permite realizar modificaciones al plan de fertirriego con el fin de corregir deficiencias si es necesario.



La Red Meteorológica Automatizada (RMA) de la agroindustria de la caña, con estaciones distribuidas en el valle del río Cauca, suministra información de tiempo y clima que permite hacer previsiones con cierto grado de certeza. Con el valor de la evaporación máxima diaria y la curva de evapotranspiración del cultivo es posible diseñar un plan de manejo ajustado a la demanda de riego. Los instrumentos de monitoreo indirecto de la humedad del suelo, entre ellos los tensiómetros, también son de gran ayuda en el manejo del riego por goteo, el cual exige el mantenimiento de un régimen de humedad a baja tensión, cercano a capacidad de campo.

Disponer de una fuente de agua de excelente calidad es un requisito esencial en el riego por goteo y el fertirriego, de manera que es obligatorio realizar análisis de agua previos al establecimiento del sistema. Los informes de calidad del agua son necesarios para planificar y diseñar el sistema, tomar decisiones de manejo y mantenimiento y prever soluciones a situaciones de operación. Son útiles cuando ocurre taponamiento de filtros y goteros, porque ayudan a identificar las causas y las soluciones posibles: selección de un filtro más adecuado, tratamientos químicos como la cloración para el control de bacterias y materia orgánica, corrección del pH del agua en tratamientos de limpieza del sistema o para facilitar la disponibilidad de sales nutritivas en solución y su absorción, y oxidación para corregir problemas de hierro y manganeso de las aguas subterráneas, muy comunes en la zona central del valle del río Cauca.



La necesidad de un diseño hidráulico que conjugue criterios económicos y de uniformidad del riego en función de las condiciones topográficas y de suelo, un nuevo diseño de campo que modifique los anteriores pensados para el riego por gravedad e integre las exigencias de la cosecha mecanizada, junto con una preparación del suelo que facilite el movimiento capilar del agua y los fertilizantes en ella disueltos son aspectos que requieren estudios básicos para asegurar el éxito en todo sistema de riego por goteo.

No se pueden pasar por alto las dificultades ocasionadas en la fábrica y los campos por los restos de tuberías, cintas de riego y otros componentes del sistema de difícil degradación, para lo cual es necesario que en el cultivo y la cosecha se asegure un plan de manejo. Actualmente parece que el retiro y reutilización de estos desechos está por el lado de las empresas dedicadas al reciclaje de plásticos.

Esta publicación tiene el propósito de contribuir al mejor uso de una tecnología innovadora en la producción de cultivos. No se pretende agotar todos los aspectos y posibilidades que ofrece el riego por goteo en el cultivo de la caña de azúcar, sino recoger en parte el conocimiento adquirido en las experiencias de adopción del sistema en fincas de agricultores del valle del río Cauca.

Relaciones agua-suelo



Introducción

En la relación agua-suelo se describen las propiedades de los suelos que afectan la retención y el movimiento del agua en ellos.

El cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca más del 90% del área recibe aplicación de riego con impacto positivo en la producción de caña y los rendimientos de azúcar, aun en suelos con fertilidad variable en diferentes zonas. La presencia de inclusiones de suelos de textura gruesa con baja capacidad de retención de humedad en suelos de textura fina dificulta el manejo del riego por gravedad y su efectividad. En la zona de piedemonte, donde predominan los suelos estratificados poco profundos con altos contenidos de agregados gruesos se requiere un manejo diferencial del riego, por lo que es necesario conocer las relaciones que existen entre sus componentes como base del manejo racional del agua.

El suministro oportuno de agua es indispensable para alcanzar óptimos rendimientos en el cultivo de la caña de azúcar. En las zonas azucareras de Colombia con condiciones de precipitación bastante homogéneas es posible distinguir áreas semisecas y húmedas y una alta diversidad de suelos con características físicas y químicas que determinan en gran parte la respuesta productiva del cultivo.

De acuerdo con sus condiciones de pendiente, profundidad, textura y estructura, el suelo regula la disponibilidad de agua para el cultivo, sea esta proveniente del riego o la precipitación. Los suelos finos predominantes en la zona baja y plana son más profundos y retienen mayor cantidad de agua que los presentes en las zonas de piedemonte de las cordilleras Central y Occidental, lo cual representa la necesidad de riegos más frecuentes y con láminas de riego menores en estas últimas. Para la planificación de los riegos en el cultivo de la caña de azúcar es necesario conocer las características físicas de los suelos con el objetivo de ajustar el balance entre el agua retenida y la demanda por evapotranspiración. En todos los casos el estudio detallado de suelos suministra información muy valiosa sobre la textura, la capacidad de retención de humedad, la profundidad y la disponibilidad de agua y nutrientes de los suelos en las diferentes zonas agroecológicas del valle del río Cauca.



Relaciones de masa y volumen de los constituyentes del suelo

El suelo está constituido por tres fases mezcladas: una gaseosa, una líquida y una sólida. La proporción de estas fases en el suelo es determinante de sus propiedades físicas, las cuales deben ser conocidas y analizadas para establecer un sistema de riego. La información actualizada acerca de las condiciones físicas de las tierras con riego es indispensable en las decisiones de diseño agronómico y diseño hidráulico del sistema, así como en los procesos de instalación, operación y mantenimiento.

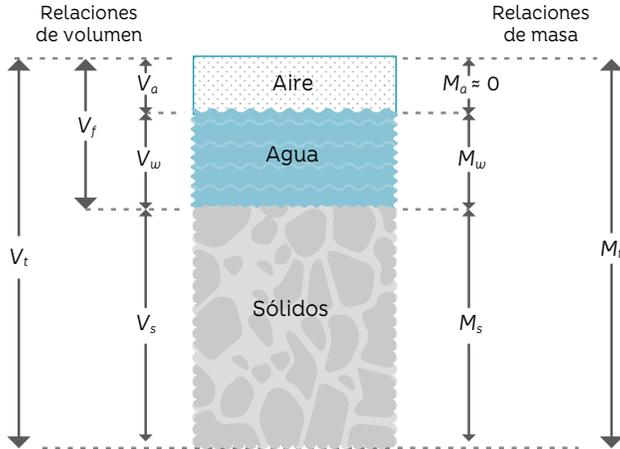
De acuerdo con los principios de la física y sus definiciones la dimensión es la medida de una magnitud física y la unidad, la cantidad numérica que se le asigna a una dimensión. El Cuadro 1.1 describe algunas magnitudes físicas de uso frecuente en la gestión del agua agrícola usando dos sistemas dimensionales: MLT, basado en las variables independientes masa (M), longitud (L) y tiempo (T); y FLT, basado en la variable fuerza (F), la cual es dependiente o derivada de M , L y T , en tanto $F = (M * L) / T^2$. El valor numérico de cada magnitud se asigna de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI), usando los sistemas CGS: centímetro (cm), gramo (g) y segundo (s); y MKS: metro (m), kilogramo (kg) y segundo (s). La unidad de masa en el SI se define como la masa del prototipo internacional del kilogramo, según la cual $1 \text{ g} = 0.001 \text{ kg} = 10^{-3} \text{ kg}$.

► **CUADRO 1.1.** Descripción de algunas magnitudes físicas usando los sistemas dimensionales MLT (masa, longitud, tiempo) y FLT (fuerza, longitud, tiempo), donde $F = (M * L) / T^2$.

Variable	MLT	FLT
Área	L^2	L^2
Volumen	L^3	L^3
Velocidad	L / T	L / T
Caudal	L^3 / T	L^3 / T
Densidad	M / L^3	$(F * T^2) / L^4$
Presión	$(M / L) / T^2$	F / L^2

Fuente: adaptado de Duarte y Niño (2001).

El esquema de la Figura 1.1 indica las relaciones de masa y volumen en la mezcla de suelo mostrando los parámetros dimensionales de cada fase por separado, donde V_a y M_a son la masa y el volumen de aire, V_w y M_w de agua, V_s y M_s de sólidos; V_f es el volumen de poros y V_t y M_t son los totales. A continuación se describen las principales magnitudes físicas derivadas de estas relaciones.



► FIGURA 1.1. Diagrama esquemático del suelo como un sistema trifásico.
Fuente: tomado de Hillel (1998).

Densidad, ρ

La densidad (ρ) es la relación que existe entre una masa y el volumen que ella ocupa.

$$\rho = \frac{M}{L^3} \quad (1.1)$$

Asociadas a esta propiedad del suelo se definen las densidades: real, aparente, aparente total y relativa.

Densidad real, ρ_s

También llamada densidad de sólidos es la relación entre la masa de sólidos y su volumen.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (1.2)$$

Densidad aparente, ρ_b

Es la relación entre la masa de sólidos y el volumen total de suelo.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} \quad (1.3)$$

La densidad aparente corresponde a la relación entre la masa de suelo seco y el volumen total de la muestra de suelo. Esta propiedad se utiliza como indicador de la condición física de un suelo porque se afecta con los procesos de mecanización y con la compactación; disminuye con la labranza y aumenta con el tránsito de equipos (Rodríguez y Valencia, 2015). En suelos donde la densidad aparente es alta la tasa de escorrentía superficial aumenta y la tasa de infiltración disminuye, de modo que los suelos pueden ser más susceptibles a la erosión.

Densidad aparente total, ρ_t

Es la masa total del suelo por unidad de volumen total.

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} = \frac{(M_w + M_s)}{V_t} = \left(\frac{M_w}{V_t}\right) + \rho_b \quad (1.4)$$

Densidad relativa o gravedad específica aparente, S_b

Es la razón entre la densidad aparente del suelo (ρ_b) y la densidad del agua ($\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$). Es una variable adimensional, de magnitud igual que la densidad aparente.

$$S_b = \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (1.5)$$

Porosidad, f

La porosidad (f) es la relación entre el volumen ocupado por los poros del suelo y el volumen total de suelo. Variable adimensional ($\%, L^3/L^3$) que la FAO clasifica en cinco rangos (Cuadro 1.2).

$$f = \frac{V_f}{V_t} \quad (1.6)$$

► CUADRO 1.2. Clasificación de la porosidad del suelo.

Porosidad del suelo	(%)
Muy baja	<2
Baja	2 – 5
Media	5 – 15
Alta	15 – 40
Muy alta	>40

Fuente: tomado de FAO (2009).

Microporosidad, μf

Es la humedad volumétrica de un suelo a capacidad de campo.

Macroporosidad, Mf

Es la diferencia entre la porosidad total del suelo (f) y la microporosidad.

Porosidad aireada, f_a

Es el contenido relativo de aire del suelo.

$$f_a = \frac{V_a}{V_t} \quad (1.7)$$

Relación de vacíos, e

La relación de vacíos (e) indica el volumen relativo de poros del suelo en relación con el volumen de sólidos.

$$e = \frac{V_f}{V_s} \quad (1.8)$$

Relaciones de humedad

Expresan el contenido relativo de agua del suelo. Por ser relaciones de masa o de volumen, se pueden expresar de manera adimensional en forma decimal o porcentual.

Humedad gravimétrica, θ_w

Es la relación entre la masa de agua del suelo y la masa de sólidos.

$$\theta_w = \frac{M_w}{M_s} \quad (1.9)$$

Humedad volumétrica, θ

Es la relación entre el volumen de agua del suelo y el volumen total de suelo.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (1.10)$$

Grado de saturación, θ_s

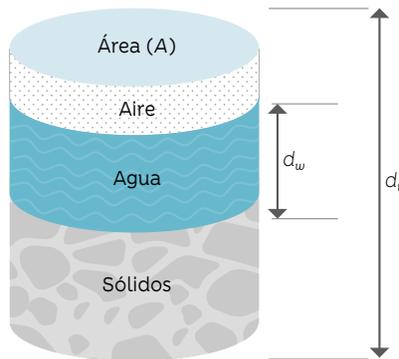
Es la relación entre el volumen de agua del suelo y el volumen de poros.

$$\theta_s = \frac{V_w}{V_f} \quad (1.11)$$



Relaciones de láminas

El contenido de humedad del suelo generalmente se expresa como lámina o volumen de agua por unidad de área. Las relaciones de láminas se ilustran en la Figura 1.2. donde A es el área de la muestra de suelo, d_t es el espesor o profundidad de la muestra y d_w es el espesor de la lámina de agua contenida en la muestra. La representación dimensional de estas variables es L^2 para A y L para d_t y d_w .



► FIGURA 1.2. Relaciones de láminas de los componentes del suelo.

De acuerdo con este esquema y utilizando las magnitudes físicas definidas antes, el espesor de la lámina de agua (d_w) en una muestra de suelo se puede obtener conociendo la humedad volumétrica (Θ) o la humedad gravimétrica (Θ_w).

Si

V_t , volumen total de la muestra en L^3

$$V_t = A * d_t$$

V_w , volumen de agua en L^3

$$V_w = A * d_w$$

Θ , humedad volumétrica

$$\Theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{(A * d_w)}{(A * d_t)} = \frac{d_w}{d_t}$$

entonces, el espesor de la lámina de agua:

$$d_w = \Theta * d_t \quad (1.12)$$

También

$$\Theta_w, \text{ humedad gravimétrica} \quad \Theta_w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{(\rho_w * V_w)}{(V_t * \rho_b)} = \Theta * \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)$$

$$\text{a partir de la Ecuación 1.5} \quad S_b = \frac{\rho_b}{\rho_w}$$

$$\text{por lo tanto} \quad \Theta = \Theta_w * S_b$$

finalmente, el espesor de la lámina de agua

$$d_w = \Theta_w * S_b * d_t \quad (1.13)$$

Ejemplo. Determinar el contenido de humedad de un suelo franco arcilloso a capacidad de campo utilizando el sistema de unidades CGS a partir de los siguientes datos:

Volumen de la muestra de suelo: $V_t = 1 \text{ cm}^3$

Densidad real: $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$

Densidad aparente: $\rho_b = 1.35 \text{ g/cm}^3$

Gravedad específica aparente: $S_b = \rho_b / \rho_w$

$$S_b = 1.35 \text{ g/cm}^3 / 1.00 \text{ g/cm}^3 = 1.35$$

Humedad volumétrica: $\Theta = \Theta_w * S_b = 0.27 * 1.35 = 0.36$

Porosidad: $f = 1 - (\rho_b / \rho_s) = 1 - (1.35 / 2.65) = 0.49$

Porosidad aireada: $f_a = f - \Theta = 0.49 - 0.36 = 0.13$

Grado de saturación: $\Theta_s = \Theta / f = 0.36 / 0.49 = 0.73$

Volumen de aire: $V_a = f_a * V_t = 0.13 * 1.00 \text{ cm}^3 = 0.13 \text{ cm}^3$

Volumen de agua: $V_w = \Theta * V_t = 0.36 * 1.00 \text{ cm}^3 = 0.36 \text{ cm}^3$

Volumen de vacíos: $V_f = V_a + V_w = 0.13 \text{ cm}^3 + 0.36 \text{ cm}^3 = 0.49 \text{ cm}^3$

Volumen de sólidos: $V_s = V_t - V_f = 1.00 \text{ cm}^3 - 0.49 \text{ cm}^3 = 0.51 \text{ cm}^3$

Masa de aire: $M_a = 0$

Masa de agua: $M_w = \rho_w * V_w = 1.00 \text{ g/cm}^3 * 0.36 \text{ cm}^3 = 0.36 \text{ g}$

Masa de sólidos: $M_s = \rho_s * V_s = 2.65 \text{ g/cm}^3 * 0.51 \text{ cm}^3 = 1.35 \text{ g}$,
o $M_s = \rho_b * V_t = 1.35 \text{ g/cm}^3 * 1.00 \text{ cm}^3 = 1.35 \text{ g}$

Microporosidad: humedad volumétrica a capacidad de campo

$$\mu f = \Theta_{cc} = 36$$

Masa total:

$$M_t = M_w + M_s = 0.36 \text{ g} + 1.35 \text{ g} = 1.71 \text{ g}$$

Densidad aparente total: $\rho_t = M_t / V_t = 1.71 \text{ g} / 1.00 \text{ cm}^3 = 1.71 \text{ g/cm}^3$

Relación de vacíos: $e = V_f / V_s = 0.49 \text{ cm}^3 / 0.51 \text{ cm}^3 = 0.96$

Macroporosidad:

$$Mf = f - \mu f = 0.49 - 0.36 = 0.13$$

De acuerdo con los datos la lámina de agua (d_w) contenida en la muestra de 1 cm^3 de suelo (V_t) tomada a 1 cm de profundidad (d_t) sería:

$$d_w = \Theta_w * S_b * d_t = 0.27 * 1.35 * 1 \text{ cm} = 0.36 \text{ cm}$$

También

$$d_w = \Theta * d_t = 0.36 * 1 \text{ cm} = 0.36 \text{ cm}$$

Así, el volumen de agua en un área (A) de 1 cm^2

$$V_w = d_w * A = 0.36 \text{ cm} * 1 \text{ cm}^2 = 0.36 \text{ cm}^3$$

$$V_w = 0.36 \text{ cm}^3$$



Retención de humedad del suelo

El agua en el suelo está sometida a fuerzas gravitacionales, capilares e higroscópicas que determinan su estado de movimiento o reposo. La distribución y la geometría de los espacios porosos, ocupados por aire y agua, dependen del tipo de partículas sólidas del suelo (textura) y de la forma de sus agregados (estructura). Los poros que se forman entre partículas semejan tubos capilares en donde el agua asciende y es retenida (Cruz V., 2015). La retención de humedad ocurre por la acción de fuerzas de tensión en los capilares del suelo; para absorber la solución nutritiva, las plantas deben hacer un esfuerzo mayor que aquel con la cual el suelo retiene la humedad.

A continuación se incluyen las definiciones acerca de las constantes de humedad del suelo y las clases de agua, las cuales se usan como referencia en la descripción de la tensión del agua y la curva de retención de humedad del suelo.

Constantes de humedad

Describen los estados relativamente estables del agua en el suelo de acuerdo con la FAO (Shaxson y Barber, 2005).

Saturación

Se refiere al contenido de agua del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua. En los suelos bien drenados es un estado temporal ya que el exceso de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazado por aire; volumétricamente corresponde a la porosidad, f .

Capacidad de campo, CC

Se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. El drenaje ocurre por la transmisión del agua a través de los poros mayores de 0.05 mm de diámetro, sin embargo la capacidad de campo puede corresponder a poros que varían entre 0.03 mm y 1 mm de diámetro. El concepto de capacidad de campo se aplica únicamente a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua es relativamente rápido; si el drenaje ocurre en suelos pobremente estructurados, por lo general continuará durante varias semanas y este tipo de suelos de estructura tan pobre raramente tiene una capacidad de campo claramente definida. La capacidad de campo se determina mejor en el campo saturando el suelo y midiendo su contenido de agua después de 48 horas de drenaje, el suelo a capacidad de campo se siente muy húmedo en contacto con las manos.

Punto de marchitez permanente, PMP

Es el contenido de agua de un suelo que ha perdido la mayor parte de su agua; y la que permanece en el suelo no está disponible para el cultivo. En esas condiciones el cultivo está permanentemente marchito y no puede revivir cuando se le coloca en un ambiente saturado de agua; al contacto manual el suelo se siente casi seco o muy ligeramente húmedo.

Capacidad de retención de humedad

Es la cantidad de agua disponible para el crecimiento de las plantas y cubre el rango de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. En el Boletín de la FAO (Shaxson y Barber, 2005) es denominada capacidad disponible de agua.

Clases de agua

Describen el agua contenida en el suelo de acuerdo con las fuerzas que gobiernan su movimiento y las constantes de humedad.

Agua gravitacional

Es el agua contenida en los macroporos del suelo la cual drena fácilmente de la zona de raíces obedeciendo a su propio peso (fuerzas gravitacionales) y es poco aprovechada por las plantas.

Agua capilar

Es el agua contenida en el suelo en el rango de humedad entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Su movimiento está regulado por las fuerzas de tensión que predominan en los espacios capilares cuando en un suelo saturado el drenaje se reduce y las fuerzas gravitacionales dejan de prevalecer. La humedad contenida en dicho rango se conoce como capacidad de retención de humedad del suelo, agua útil o agua aprovechable. Puede ser determinada como lámina a partir de la Ecuación 1.13, $d_w = \Theta_w * S_b * d_t$ y reemplazando $\Theta_w = \Theta_{wCC} - \Theta_{wPMP}$ para expresar la lámina útil (d_u),

$$d_u = (\Theta_{wCC} - \Theta_{wPMP}) * S_b * d_t \quad (1.14)$$

donde

Θ_{wCC} es la humedad gravimétrica del suelo a capacidad de campo,

Θ_{wPMP} es la humedad gravimétrica del suelo a punto de marchitez permanente,

S_b es la gravedad específica aparente y

d_t es la profundidad efectiva de suelo, hasta donde llega el mayor porcentaje de raíces.

En general se suele asignar a la capacidad de campo un valor de tensión comprendido entre 0.1 atmósferas (suelos livianos: texturas gruesas) y 0.3 atmósferas (suelos pesados: texturas finas) y al punto de marchitez permanente un valor de 15 atmósferas, aunque este último depende realmente de la especie vegetal cultivada. Otras unidades de fuerza de uso frecuente son el centibar (cb) y el kilopascal (kPa); así en suelos arenosos a capacidad de campo el valor de tensión de 0.1 atm = 10 cb = 10 kPa.

Agua higroscópica

Lámina de agua muy delgada y firmemente adherida a las partículas del suelo con una tensión o fuerza de retención tan alta que las plan-

tas no pueden extraerla. Es agua no aprovechable y se encuentra en el límite inferior del punto de marchitez permanente donde las condiciones de tensión hacen que cese todo movimiento en el estado líquido y solo haya movimiento del agua en la forma de vapor.



Tensión del agua en el suelo

La capacidad de retención de humedad del suelo tiene relación directa con la magnitud de las fuerzas de tensión en la zona capilar. De acuerdo con Cruz V. (2015) los espacios porosos más próximos a la superficie de las partículas del suelo son los primeros en llenarse de agua y los últimos en vaciarse.

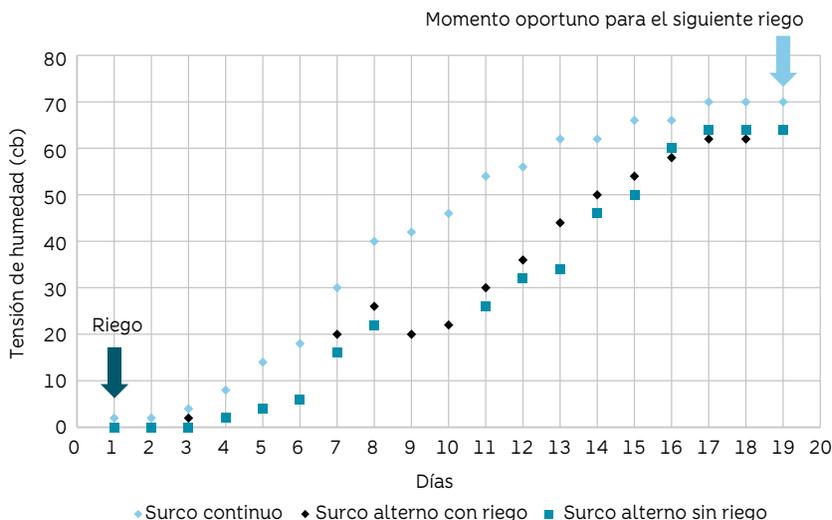
La tensión del agua se determina con un tensiómetro. El uso de este instrumento en la labor de riego obedece al hecho de que toda especie vegetal da mayores rendimientos cuando es regada a un valor de tensión conocido como potencial hídrico óptimo. Los valores de tensión junto con la curva de retención de humedad son herramientas útiles para determinar las láminas de agua extraídas por las plantas.

Con el fin de ilustrar los cambios en la tensión del agua durante un ciclo de riego se toma como referencia el seguimiento realizado en un cultivo de caña de 10.3 meses de edad en el valle del río Cauca, en un suelo de familia textural esquelética francosa, consociación Acuario (Typic Haplustoll) que recibió riego con el sistema de caudal reducido en las modalidades

de surco continuo y surco alterno (Figura 1.3). Con el suelo a capacidad de campo y durante 20 días sin eventos de lluvia se hicieron las mediciones con el tensiómetro en los surcos con riego y en los surcos sin riego, tiempo en el cual se llegó a una tensión próxima a 70 cb ($0.7 \text{ atm} = 70 \text{ kPa}$).



Batería de tensiómetros.



► **FIGURA 1.3.** Monitoreo de la tensión del agua durante un ciclo de riego con caudal reducido en las modalidades de surco continuo y surco alterno en un cultivo de caña de azúcar de 10.3 meses de edad. Suelo de la consociación Acuario, Typic Haplustoll, de familia textural esquelética francosa, en el valle del río Cauca.



Curvas de retención de humedad

Cada suelo en función principalmente de su textura y estructura presenta una relación definida entre tensión y contenido de humedad en la franja capilar. Esta relación, conocida como curva característica de retención de humedad, puede ser expresada matemáticamente mediante un modelo de tipo potencial de la forma:

$$\theta_w = a * h_p^b \quad (1.15)$$

donde

θ_w es la humedad gravimétrica, h_p es el potencial mátrico o de presión y a , b son constantes.

El potencial mátrico del suelo (h_p) corresponde a la energía con que se encuentra retenida el agua por las partículas o matriz del suelo, se mide en unidades de presión o tensión y es un indicador confiable para caracterizar la disponibilidad de agua del suelo; a medida que el h_p aumenta, la absorción radical de agua disminuye. Las lecturas de tensiómetros instalados a dos profundidades del suelo y en medio del cultivo proporcionan un índice eficiente de cuándo y cuánto regar.

🔹 **Ejemplo.** Determinar la ecuación de regresión que define la curva de retención de humedad de un suelo X, a partir de los siguientes valores de tensión y humedad volumétrica.

Tensión (atm)	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0	15.0
Humedad volumétrica (%)	67.6	41.2	32.8	28.2	24.4	17.5	11.6	8.5	7.1

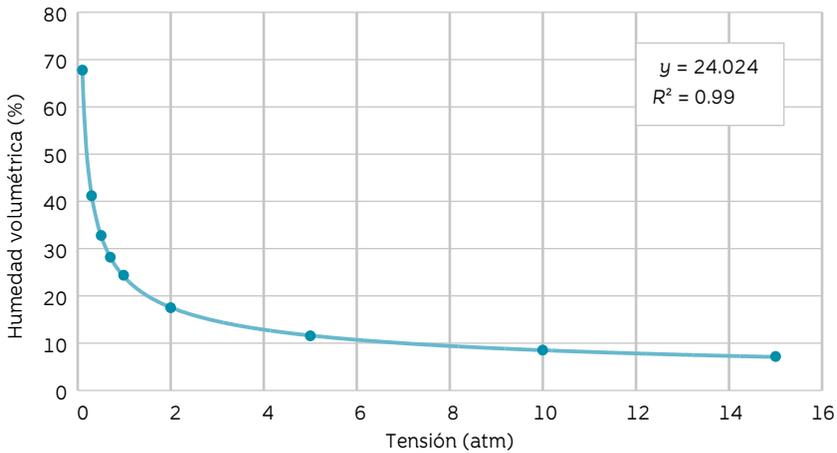
Ajustando los datos a una ecuación potencial se llega a la ecuación siguiente

$$\Theta = 24.024 h_p^{-0.45} \quad r = -0.999$$

Para un potencial mátrico (h_p) igual a 3 atm, entonces

$$\Theta = 14.51\%$$

La representación gráfica de esta relación se ajusta a la curva típica de retención de humedad del suelo (Figura 1.4).



► **FIGURA 1.4.** Ejemplo de curva típica de retención de humedad del suelo.



Movimiento del agua en el suelo

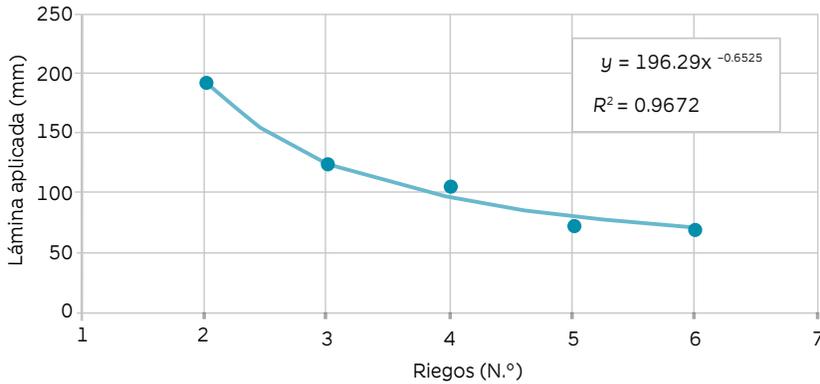
El agua se mueve en el suelo, independiente del grado de humedad, por la existencia de un gradiente de potencial, desde un punto de mayor a un punto de menor potencial. El movimiento puede ocurrir en condiciones de saturación o no saturación. En condiciones de suelo saturado el gradiente es causado por diferencias en la cabeza hidrostática; mientras que en condiciones de no saturación, el gradiente es igual a la sumatoria de la diferencia en la cabeza hidrostática y la diferencia en la tensión de humedad en el suelo. En ambos casos el movimiento puede ser descrito utilizando la Ley de Darcy (Buckingham, 1907), que considera que la velocidad de flujo del agua en el suelo es proporcional al gradiente hidráulico que se presenta. Los movimientos del agua en el suelo se describen a continuación.

Infiltración

De acuerdo con lo indicado en la *Guía para la evaluación de la calidad y la salud del suelo* (USDA, 1999) la infiltración es el paso vertical del agua hacia el interior del suelo a través de su superficie. La velocidad de infiltración depende de la textura del suelo y su grado de agregación y del contenido de humedad. La tasa básica de infiltración se registra cuando el suelo permanece en contacto con el agua durante un período prolongado; su determinación es necesaria para el diseño de sistemas de riego superficial y por aspersión.

La capacidad de un suelo para absorber agua depende del contenido de humedad inicial, de modo que la velocidad de infiltración es mayor cuando el suelo está seco que cuando está húmedo. El contenido de humedad inicial es un factor importante cuando se comparan tasas de infiltración de agua en suelos diferentes; por lo anterior, cuando se hacen caracterizaciones o mediciones de infiltración los suelos deben presentar contenidos de humedad inicial similares.

La labranza del suelo afecta la velocidad inicial de infiltración de agua debido a la destrucción de capas superficiales compactadas (Figura 1.5). No obstante, el uso excesivo de maquinaria puede alterar las condiciones físicas del suelo destruyendo sus agregados y deteriorando la estructura, lo que favorece la presencia de capas compactadas con menos espacios porosos y consecuentemente con menores velocidades de infiltración de agua.



► **FIGURA 1.5.** Efecto del número de riegos aplicados en la lámina de agua infiltrada.

Fuente: tomado de Campos y Cruz (2014).

El régimen de infiltración es sensible a condiciones cercanas a la superficie del suelo y está sometido a un cambio significativo debido al uso del mismo, al manejo y al tiempo. Está afectado por el desarrollo de las raíces de las plantas, huecos de lombrices, agregación del suelo y por un incremento general de la materia orgánica estable. La tasa de infiltración es más rápida en la medida que el espacio poroso es mayor y decrece cuando el volumen de poros disminuye a través del perfil hasta capas más densas en el subsuelo (USDA, 1999).

La textura o porcentaje de partículas de arena, limo y arcilla afecta la tasa de infiltración, así los suelos arenosos presentan regímenes de infiltración más rápidos (Cuadro 1.3); condición que puede ser alterada por la presencia de capas superficiales compactadas o agrietadas. El Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU. propone siete clases de infiltración de agua según la velocidad a la cual esta ocurre (Cuadro 1.4). En la caracterización de la infiltración en función del manejo del agua se hace referencia a la infiltración acumulada (I) para indicar la lámina infiltrada en un tiempo determinado (dimensión, L); la infiltración instantánea (I') para indicar la velocidad con la que ocurre el fenómeno de infiltración, la cual disminuye con el tiempo (L / T); y la infiltración promedio que resulta de dividir la lámina infiltrada por el tiempo transcurrido (L / T).

► **CUADRO 1.3.** Velocidades estables de infiltración para grupos mayores de textura de suelo, en suelos humectados en profundidad.

Tipo de suelo	Velocidad estable de infiltración (cm/h)
Arenas	2.03
Suelos arenosos y limosos	1.02 – 2.03
Suelos francos	0.51 – 1.02
Suelos arcillosos	0.10–0.51
Suelos arcillosos y sódicos	<0.10

Fuente: adaptado de Hillel, D. (1982). *Introduction to soil physics*. Consultado en USDA (1999).

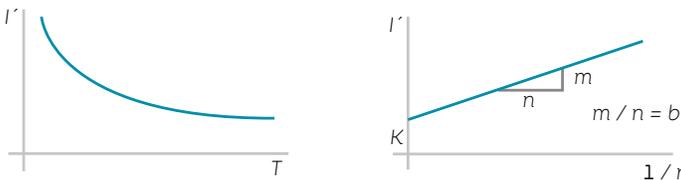
► **CUADRO 1.4.** Velocidades y clases de infiltración.

Clases de infiltración	Velocidad de infiltración (cm/h)
Rápido	>50.8
Moderadamente rápido	50.8 – 15.24
Moderado	15.24 – 5.08
Moderadamente lento	5.08 – 1.52
Lento	1.52 – 0.51
Muy lento	0.51 – 0.0038
Impermeable	<0.0038

Fuente: adaptado de USDA (1999).

Modelo de infiltración de Dasberg y Bresler

Cuando un gotero aplica un caudal (q) en un suelo se forma una zona de inundación que se puede considerar de forma circular, la cual crece con el tiempo hasta llegar a un tamaño que equilibra la tasa de aplicación con la tasa de infiltración. Para este caso, Dasberg y Bresler (1985) desarrollaron un método consistente en medir el radio (r) de la zona inundada obtenida a diferentes tiempos cuando se aplica un caudal constante (q) a partir de lo cual, mediante una regresión lineal y tomando como variable independiente el inverso de r (Figura 1.6), se obtiene la Ecuación de infiltración (Ecuación 1.6).



► **FIGURA 1.6.** Representación del modelo de infiltración de Dasberg y Bresler.

$$I' = K + b * \frac{1}{r} \quad (1.16)$$

donde

I' es la velocidad de infiltración,
 K es la conductividad hidráulica saturada,
 b es la pendiente de la línea de regresión y
 r es el radio de la zona inundada.

Para este caso

$$b = \frac{4K}{\alpha\pi} \quad \text{siendo } \alpha \text{ una constante característica del suelo, dada en cm}^{-1}$$

Este modelo inverso encierra un modelo cuadrático en r , que se obtiene al reemplazar I' por la relación entre el caudal y el área de la zona inundada.

Así

$$I' = \frac{q}{\pi r^2}$$

igualando

$$\frac{q}{\pi r^2} = K + b * \frac{1}{r}$$

reemplazando y simplificando

$$q = \pi r^2 \left(K + \frac{4K}{\alpha\pi} * \frac{1}{r} \right) = K * \pi r^2 + \left(4 \frac{K}{\alpha} \right) * r$$

ordenando

$$K * \pi r^2 + \left(\frac{4K}{\alpha} \right) * r - q = 0$$

La anterior ecuación de segundo grado en r tiene una solución positiva que corresponde al radio máximo o final (r_f) de la zona inundada

$$r_f = - \frac{2}{\alpha\pi} + \sqrt{\left(\frac{2}{\alpha\pi} \right)^2 + \frac{1000q}{K\pi}}$$

donde las unidades son: r_f en cm, α en cm^{-1} , K en cm/h y q en L/h .

Conductividad hidráulica

En condiciones de saturación la Ley de Darcy puede ser expresada en forma matemática según la Ecuación 1.17, que considera la velocidad del flujo (V) como una función de la conductividad hidráulica saturada (K) multiplicada por el gradiente hidráulico ($\frac{\Delta H}{\Delta S}$). La conductividad hidráulica es el factor de proporcionalidad en la Ley de Darcy y es la propiedad de un suelo de permitir el paso del agua a través de él (Cuadro 1.5).

$$V = K * \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad (1.17)$$

En riego por goteo predomina el flujo de agua capilar, en este caso la Ecuación de Darcy toma la forma:

$$V = K (h_p) * \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad (1.18)$$

donde

V es la velocidad de flujo,

$K (h_p)$ es la conductividad hidráulica no saturada a la tensión h_p y

$\frac{\Delta H}{\Delta S}$ es el gradiente hidráulico.

► **CUADRO 1.5.** Clasificación de la conductividad hidráulica según la tasa de percolación del agua en el suelo.

Clasificación	Tasa de percolación (mm/h)
Rápida	>160
Moderadamente rápida	50 - 160
Moderada	16 - 50
Moderadamente lenta	5.0 - 16
Lenta	1.25 - 5.0
Muy lenta	<1.25

Fuente: adaptado de USDA (s.f.) Soil Conservation Service. Consultado en Kohnke (1968).

La conductividad hidráulica capilar se expresa como una función exponencial de la conductividad hidráulica saturada mediante la relación:

$$K(h_p) = K * e^{\alpha h_p} \quad (1.19)$$

donde

α es una propiedad del suelo, en cm^{-1} (esta constante se encuentra en un rango entre 10^{-4} y 10^{-2} para arcillas, entre 10^{-2} y 10^{-1} para limos y en un valor de 10^{-1} para la mayoría de los suelos arenosos),

h_p es la tensión de humedad en el suelo, en cm (valor negativo),

K es la conductividad hidráulica saturada, en cm/h,

$K(h_p)$ es la conductividad hidráulica no saturada, en cm/h y

e es la base de los logaritmos neperianos.

Aplicando la Ecuación 1.19 en un suelo franco con $K = 1.4 \text{ cm/h}$, $\alpha = 1.69 * 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$, $h_p = -5.0 \text{ cb} = -50 \text{ cm}$, se tiene: $K(-50) = 0.6 \text{ cm/h}$.

Referencias

- Buckingham, E. (1907). *Studies on the movement of soil moisture*. USDA, *Bureau of Soils*, 38. Recuperado de <https://archive.org/stream/studiesonmovemen38buck#page/50/mode/2up>
- Campos, A. y Cruz, D.M. (2014). *Riego con caudal reducido en cultivos de caña de azúcar. Guía metodológica*. Cali: Cenicaña.
- Cruz, J.R. (2015). *Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca*. Cali: Cenicaña.
- Dasberg, S. y Bresler, E. (1985). *Drip irrigation manual*. Bet Dagan: International Irrigation Information Center (IIIC).
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica. USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf.
- Duarte, C.A. y Niño, J.R. (2001). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Recuperado de <https://dewagumay.files.wordpress.com/2011/12/environmental-soil-physics.pdf>

Kohnke, H. (1968). *Soil physics*. New York: McGraw-Hill.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>

Rodríguez, L.A. y Valencia, J.J. (2015). *Preparación de suelos para la producción sostenible de caña de azúcar. Guía metodológica*. Cali: Cenicaña.

Shaxson, F. y Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. *Boletín de suelos de la FAO*, 79. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-y4690s.pdf>

Símbolos y abreviaturas

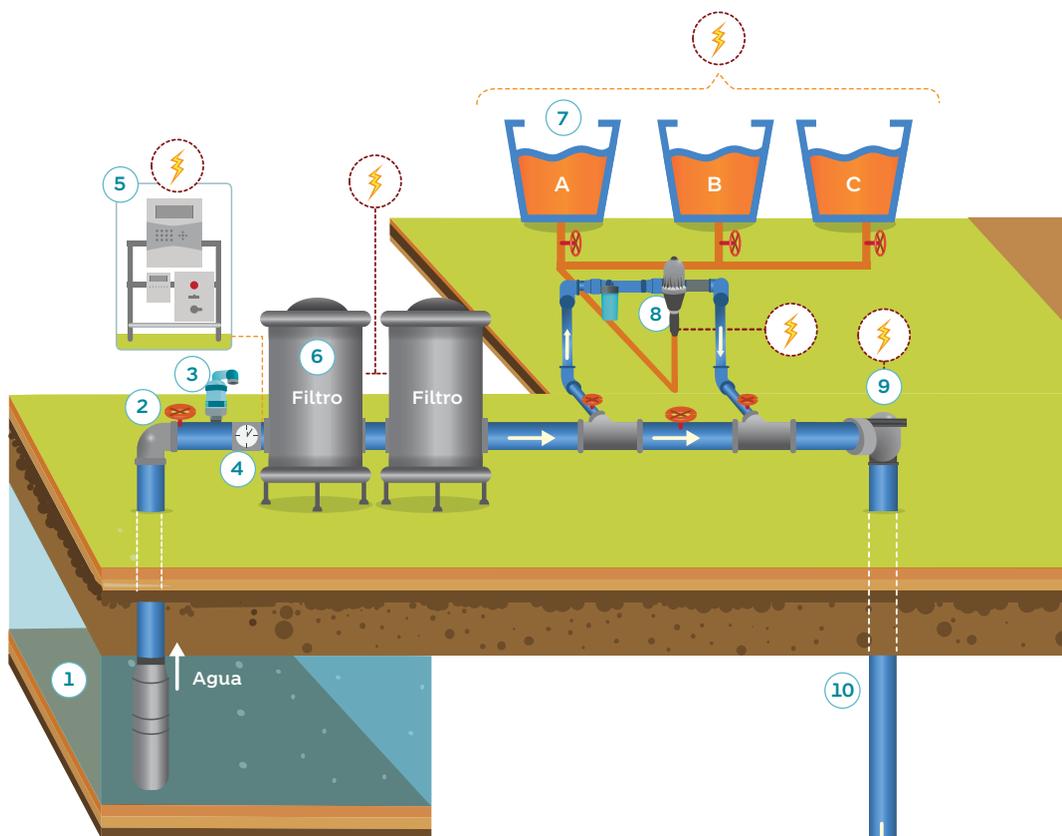
A	Área
a, b	Constantes del suelo
CC	Capacidad de campo del suelo
CGS	Centímetro, Gramo, Segundo (Sistema de unidades del SI)
d_t	Profundidad efectiva del suelo, espesor de la muestra de suelo
d_u	Lámina útil, lámina de agua aprovechable del suelo
d_w	Lámina de agua, espesor de la lámina en una muestra de suelo
e	Relación de vacíos del suelo
F	Fuerza
f	Porosidad del suelo
f_a	Porosidad aireada del suelo
FLT	Fuerza, Longitud, Tiempo (Sistema dimensional)
h_p	Potencial mátrico del suelo, potencial de presión
I	Infiltración acumulada de agua en el suelo
I'	Velocidad de infiltración, velocidad instantánea de infiltración
$K(h_p)$	Conductividad hidráulica no saturada a la tensión h_p
K	Conductividad hidráulica saturada
L	Longitud
M	Masa de suelo
M_a	Masa de aire del suelo

M_f	Macroporosidad del suelo
MKS	Metro, Kilogramo, Segundo (Sistema de unidades del SI)
MLT	Masa, Longitud, Tiempo (Sistema dimensional)
M_s	Masa de sólidos del suelo
M_t	Masa total de suelo
M_w	Masa de agua del suelo
n	Número de datos
PMP	Punto de marchitez permanente del suelo
q	Caudal del gotero, caudal aplicado por un gotero
r	Radio de la zona inundada por un gotero
r_f	Radio final de la zona inundada por un gotero, radio máximo
S_b	Densidad relativa del suelo, gravedad específica aparente
SI	Sistema Internacional de Unidades
T	Tiempo
V	Velocidad del flujo de agua
V_a	Volumen de aire del suelo
V_f	Volumen de poros del suelo
V_s	Volumen de sólidos del suelo
V_t	Volumen total del suelo
V_w	Volumen de agua del suelo
$\Delta H/\Delta S$	Gradiente hidráulico
θ	Humedad volumétrica del suelo
θ_s	Grado de saturación del suelo
θ_w	Humedad gravimétrica del suelo
θ_{wCC}	Humedad gravimétrica del suelo a capacidad de campo
θ_{wPMP}	Humedad gravimétrica del suelo a punto de marchitez permanente
μ_f	Microporosidad del suelo
ρ	Densidad del suelo
ρ_b	Densidad aparente del suelo
ρ_t	Densidad aparente total del suelo
ρ_w	Densidad del agua
ρ_s	Densidad real del suelo, densidad de sólidos

Descripción del sistema de riego por goteo



Componentes de un sistema de riego por goteo



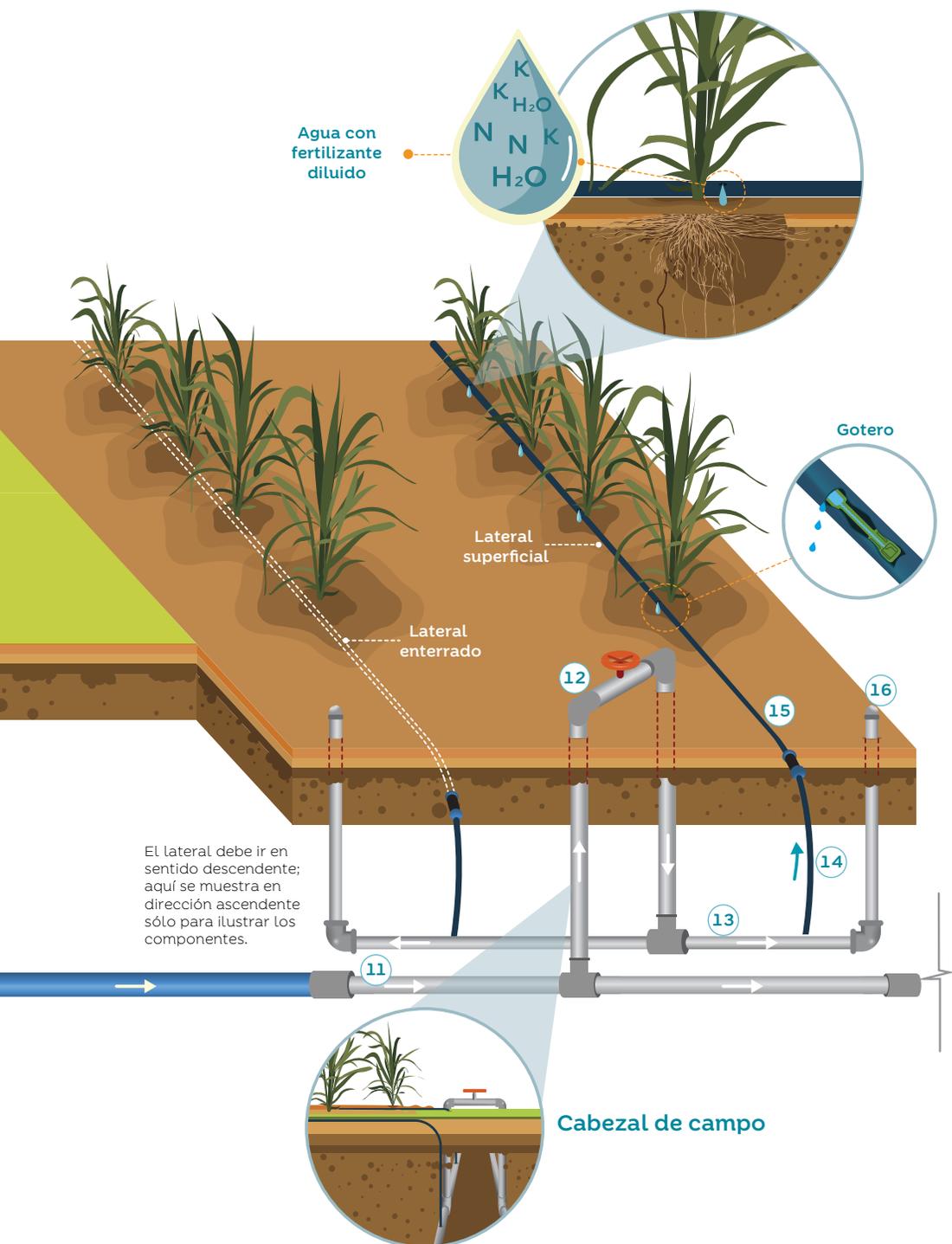
- | | |
|-----------------------------|---------------------|
| 1 Bomba lapicero | 9 Filtro de anillos |
| 2 Válvula de control | 10 Conducción |
| 3 Válvula de alivio de aire | 11 Distribución |
| 4 Contador | 12 Cabezal de campo |
| 5 Sistema de control | 13 Múltiple |
| 6 Filtro de arena | 14 Elevador |
| 7 Tanques de fertilizantes | 15 Lateral |
| 8 Inyector de fertilizantes | 16 Tapón de lavado |

 Operado desde el sistema de control



Tanques de fertilizantes

- A Disolución ácida concentrada de macronutrientes
 B Disolución concentrada de calcio
 C Disolución concentrada de micronutrientes

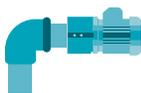


Introducción

El riego por goteo consiste en la aplicación de agua en pequeños caudales directamente en la zona radical de las plantas. En este sistema el agua debe ser filtrada previamente y es común que se utilice como medio para la aplicación de fertilizantes en solución. El riego por goteo se caracteriza por su alta frecuencia y por la aplicación localizada del agua, debido a lo cual se le conoce también como riego localizado de alta frecuencia (RLAF). En razón de estas características es el sistema más eficiente para elevar la productividad de los cultivos y en particular de la caña de azúcar con menores gastos de agua, fertilizantes y mano de obra.

En general, todos los sistemas de riego por goteo tienen los mismos componentes: un cabezal donde se instalan los sistemas de bombeo, control del riego, filtrado de agua e inyección de fertilizantes; una red de tuberías, que puede ser superficial o subterránea, a la cual se integran tuberías de conducción, distribución, múltiple y lateral; y los goteros.

En este capítulo se describen las partes básicas del sistema, sus funciones y características, como ayuda en la configuración de un sistema de riego por goteo ajustado a las condiciones agroecológicas, culturales y económicas que pueden rodear un proyecto de riego y que el agricultor debe evaluar al momento de tomar la decisión de invertir en el sistema. Al respecto cabe anotar que la innovación en riego es permanente y que los desarrollos tecnológicos exitosos se incorporan rápidamente al sistema productivo con diferencias favorables en costos y resultados del cultivo.



Sistema de bombeo

No siempre es necesario recurrir al uso de bombas para suministrar la presión requerida en un sistema de riego; en algunos casos es suficiente disponer de una toma elevada sobre las áreas por regar para captar el agua de un reservorio o una corriente superficial. Sin embargo, en determinados sitios es necesario recurrir al bombeo utilizando equipos adecuados para suministrar el caudal y la presión requeridos tanto por el cultivo como por el sistema. El caudal requerido se calcula en la planeación del sistema y la presión, en el diseño hidráulico.



Sistema de control

Los sistemas de riego por goteo pueden ser controlados en forma manual o automatizada. El nivel primario de manejo es la operación manual, cuando los regadores abren y cierran las válvulas siguiendo una programación de tiempos de aplicación y frecuencias prefijadas o guiados por lecturas de humedad o tensión obtenidas directamente en el campo. El control automatizado de la operación puede hacerse mediante temporizadores, contadores volumétricos o tensiómetros.

El uso de temporizadores, en los cuales se graba el programa de riego, es actualmente viable en cultivos extensos de caña de azúcar mediante el uso de señales de radio o vía celular. En el pasado solo eran aplicables en áreas pequeñas debido a las dificultades para enviar señales eléctricas o electrónicas a través de cables a las válvulas de control (solenoides) de los diferentes sectores de riego.

Los contadores volumétricos instalados a la entrada de los sectores de riego permiten aplicar, en un área determinada, un volumen de agua previamente registrado en un contador.

Los tensiómetros instalados en el campo pueden ser adaptados para enviar señales a una central cuando la tensión de humedad en el suelo alcanza un valor determinado, de modo que ocurra la apertura de válvulas para dar comienzo a la operación de riego.



Material orgánico retenido en un filtro de anillos.



Sistema de filtrado

Las partículas presentes en el agua disminuyen el flujo y pueden obstruir el sistema de riego en cualquier lugar. La solución es evitar el desarrollo de agentes físicos, químicos y biológicos que puedan causar directa o indirectamente el problema, inyectando agua limpia al sistema (Martínez, 2001).

Una práctica común para evitar la obstrucción de las tuberías y los goteros consiste en colocar mallas con un número adecuado de orificios por pulgada (número de *Mesh*: malla), el cual dependerá del tamaño de las partículas presentes en el caudal de riego (Cuadro 2.1). Los filtros de mallas o anillos se instalan adjuntos a los filtros de arena o grava o después de ellos y después de ellos, y sirven para retener las partículas en suspensión que deben ser retiradas del agua de riego.

► **CUADRO 2.1.** Número de *Mesh* (orificios por pulgada) de mallas utilizadas para el mantenimiento de tuberías de riego por goteo, según tipo y tamaño de partículas en el agua.

Tipo de partícula	Tamaño partícula		Número de <i>Mesh</i>
	mm	µm	
Arena muy gruesa	1.0 – 2.0	1000 – 2000	18 – 10
Arena gruesa	0.5 – 1.0	500 – 1000	35 – 18
Arena media	0.25 – 0.50	250 – 1000	60 – 35
Arena fina	0.10 – 0.25	100 – 250	160 – 60
Arena muy fina	0.05 – 0.10	50 – 100	270 – 160
Limo	0.002 – 0.005	2 – 50	400 – 270
Arcilla	<0.002	<2	-
Bacterias	0.0004 – 0.002	0.4 – 2.0	-
Virus	<0.0004	<0.4	-

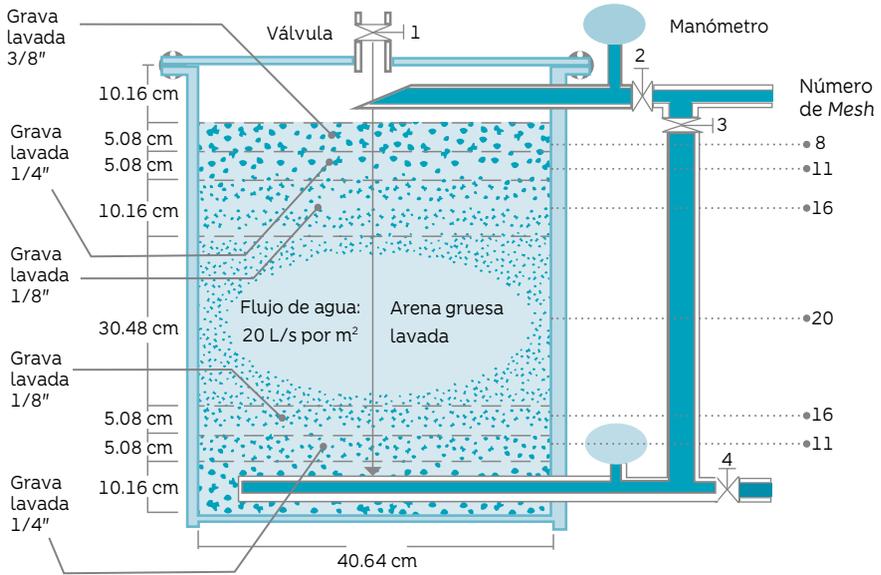
Nota: el micrón o micrómetro (µm) es una unidad de longitud equivalente a una milésima parte de un milímetro (1 µm = 0.001 mm)

Fuente: adaptado de Keller & Bleisner (1990)

Filtro de arena

Los filtros de arena consisten de grava fina y arena colocadas en un tanque cilíndrico (Figura 2.1). La grava filtra la arena fina y la materia orgánica en suspensión en el agua. Las algas tienen una gran probabilidad de ser atrapadas en los diferentes horizontes de filtración mientras que el agua pasa a través del tanque. Estos tanques de filtración pueden auto limpiarse; sin embargo, su precio es más elevado que cualquier filtro de malla o anillos, por lo que su uso debe justificarse solo cuando existen partículas más pequeñas de 200 *Mesh* y los filtros convencionales exigen frecuente limpieza y atención. Una limpieza de una o dos veces por semana es normal en aguas medianamente limpias.

El tamaño de las partículas filtradas depende del tamaño de la arena y la grava del filtro. Los materiales filtrantes se identifican con números y su equivalente granulométrico, y cada uno retiene partículas según su tamaño. Así, el material #8 se compone de partículas de 2000 µm en promedio y filtra partículas de 175 µm como mínimo; #11 de 1000 µm para 150 µm; #16 de 800 µm para 50 µm; #20 de 500 µm para 30 µm; y #30 de 300 µm para 20 µm. El filtro permite un flujo a través del cilindro de 20 L/s por m² (Zúñiga, 2004).



Fuente: adaptado de Medina San Juan (1979).



► FIGURA 2.1. Filtro de arena: esquema y estación de campo.

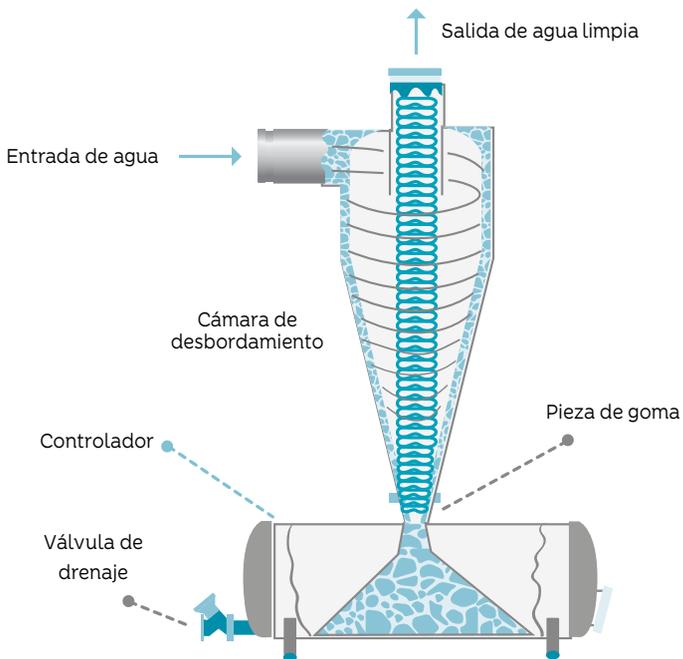


Estación automatizada de filtros de anillos.

Hidrociclón

El hidrociclón separa la arena y otras partículas más pesadas que el agua gracias a la velocidad de rotación que se genera cuando el agua entra de forma tangencial al cuerpo del equipo. Por efecto de la fuerza centrífuga, las partículas sólidas se desplazan hacia la pared del cono en una trayectoria espiral descendente que obedece a la fuerza de gravedad, hasta que caen en el depósito colector en la parte inferior del equipo; el agua limpia sale por un tubo situado en la parte superior del filtro (Figura 2.2). Las partículas sólidas deben ser retiradas del depósito periódicamente.

Como norma general, la función del hidrociclón mejora a medida que su diámetro disminuye y la pérdida de presión aumenta. El filtro alcanza una eficiencia de separación del 90% en condiciones normales de trabajo, cuando la pérdida de carga en el equipo llega a 0.2 – 0.5 bares (3 – 8 psi); una pérdida de carga menor de 3 psi reduce la eficiencia. La presión máxima de trabajo no debe superar los 8 bares (120 psi).



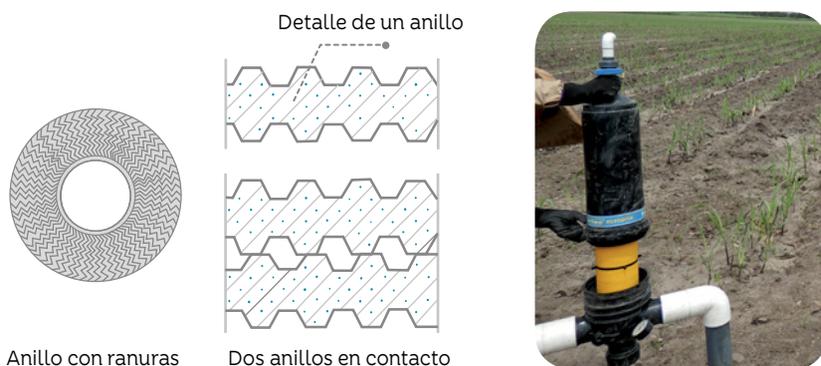
Fuente: tomado de Igunny y Chen (2012).



► FIGURA 2.2. Filtro hidrociclón: esquema y estación de campo.

Filtro de anillos

Son discos ranurados que se instalan sobre un soporte central cilíndrico perforado. El agua es filtrada al pasar a través de los conductos formados entre las ranuras de los discos o anillos concéntricos (Figura 2.3).



► FIGURA 2.3. Filtro de anillos: esquemas y equipo para instalación en campo.

Los discos pueden ser fabricados en plástico, polietileno de alta resistencia o materiales sintéticos resistentes a la corrosión que ocasionan los productos usados para el fertirriego y el mantenimiento de las tuberías. El lavado del filtro se puede automatizar por tiempo de operación o por diferencia de presión y comienza cuando las impurezas hacen que la pérdida de carga del filtro aumente por encima del rango permitido.

Al igual que los filtros de grava, los de anillos operan en superficie y en profundidad, esta última determinada por el radio de los discos. La calidad del filtrado depende del número de ranuras de cada disco. La forma de las ranuras no es uniforme y, por lo tanto, los pequeños ductos tienen diferentes secciones y tamaños; los números de *Mesh* utilizados son: 40, 80, 120, 140, 200 y 600.

En sitios donde el caudal de diseño excede la capacidad de un filtro individual se instalan varias unidades en paralelo, que pueden llegar a conformar estaciones de filtrado de gran capacidad (Figura 2.4). Por ejemplo, para filtrar un caudal de 100 m³/h se pueden instalar cuatro filtros o unidades con capacidad de 25 m³/h cada una.



► FIGURA 2.4. Batería de filtros de anillos en un sistema de riego por goteo.

Las ventajas del sistema de filtros de anillos son:

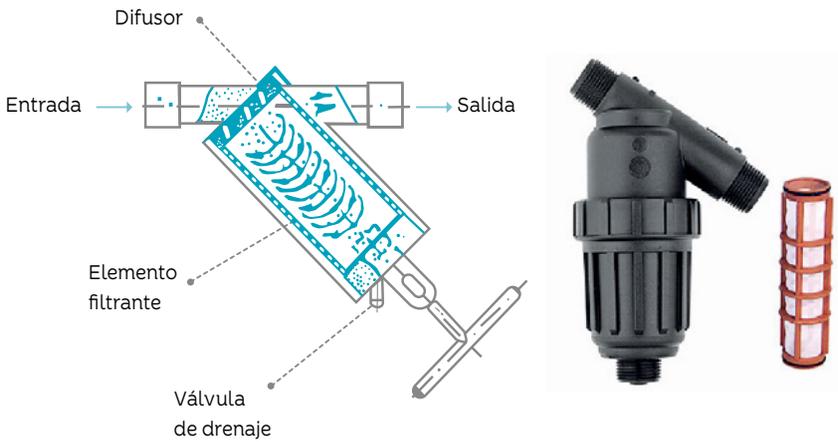
- Por su tamaño reducido, la instalación requiere menos espacio en la sala destinada a centro de control: para igual capacidad de filtrado, ocupa de dos a tres unidades menos de área que un filtro de grava.
- Su pérdida de presión es mínima y para el lavado sólo requiere entre 10–15% del volumen de agua usado en un sistema de grava.
- A diferencia del filtro de grava, el de anillos no requiere la instalación de filtros de malla complementarios.
- El mantenimiento es sencillo y los materiales sintéticos se deterioran muy lentamente.

Filtro de mallas

Se usa principalmente para tratar aguas con contaminantes inorgánicos, como arenas de distintas clases. Puede filtrar agua con cantidades moderadas de contaminantes orgánicos, pero no es recomendado para cantidades altas porque los residuos orgánicos obstruyen rápidamente las cribas o aberturas de la malla y hacen que las pérdidas de carga sobrepasen, así mismo, los niveles aceptables.

Los filtros de malla se clasifican por el tamaño de las aberturas de la malla, medido en número de *Mesh*. En riego localizado es frecuente el uso de mallas entre 50 *Mesh* y 200 *Mesh*.

El lavado de los filtros de malla puede ser automático, semiautomático o manual. El automático elimina impurezas por succión o por flujo tipo vórtice (separa partículas gruesas como el hidrociclón) y el barrido de escobillas móviles. La limpieza manual se realiza con el movimiento de la manivela y no requiere el cierre del sistema de riego (Figura 2.5).



► FIGURA 2.5. Filtro de mallas: esquema y fotografía.

Una situación muy frecuente que dificulta el manejo de los filtros de malla ocurre cuando la captación de agua se encuentra muy cerca del fondo de un reservorio. La velocidad de flujo en las cercanías de la captación es lo suficientemente alta como para arrastrar partículas del fondo y el agua, en principio con baja cantidad de sólidos en suspensión, adquiere un aspecto de turbidez. Este problema se soluciona instalando un codo o una manguera flexible fijada a un flotador a una distancia entre 0.5 m y 1.0 m de la superficie, de forma que aumente la distancia entre la captación y el fondo del reservorio (Martínez, 2001).



Sistema de inyección de fertilizantes (fertirriego)

Una de las grandes ventajas del riego por goteo es la posibilidad de aplicar fertilizantes diluidos en el agua. Esta práctica se puede realizar de diferentes maneras, según las condiciones particulares del sistema de riego. Los siguientes son los sistemas de aplicación de uso frecuente.

Gravedad

En los sistemas de riego por gravedad, colocando el tanque de fertilización a una mayor elevación que el tanque de riego (Figura 2.6).



► **FIGURA 2.6.** Depósito para la aplicación de fertilizantes por gravedad en un sistema de riego por goteo.

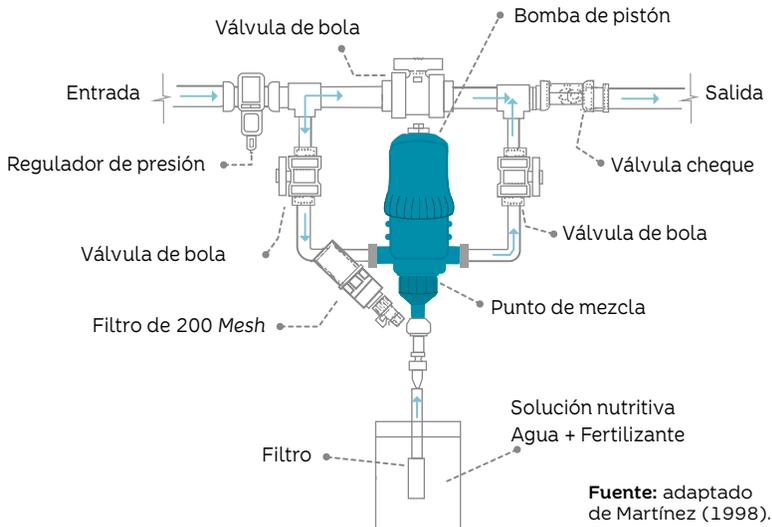
Bomba de pistón

Una bomba de pistón es accionada por la fuerza del agua, es decir, no requiere otro tipo de energía auxiliar para su funcionamiento. El inyector puede ser instalado en forma directa en la tubería matriz o en una línea lateral, tal como se describe más adelante para inyectores tipo venturi.

Dada la complejidad del inyector, que posee numerosas piezas móviles, es fundamental la calidad del agua, puesto que cualquier impureza puede afectar su buen funcionamiento.

El esquema de instalación se muestra en la Figura 2.7. Se resalta la importancia de instalar filtros de malla tanto en el flujo secundario que pasa por el inyector como en la succión de la solución madre.

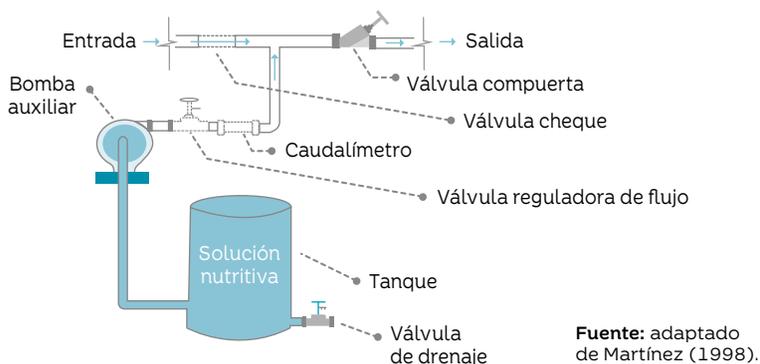
Con la bomba de pistón se pueden inyectar soluciones madre, en forma muy precisa, en el rango de 0.02 a 250 litros/hora, a una razón de dilución de 1:500 a 1:50 (0.2% a 2%).



► **FIGURA 2.7.** Bomba de pistón para inyección de fertilizante: esquema y estación de campo.

Bomba de inyección auxiliar

Se conecta a la tubería del sistema de fertilización en la descarga de la bomba de riego o en otro sitio del sistema de tuberías. Estas bombas se caracterizan por su bajo caudal y alta presión de trabajo, y porque están construidas en materiales resistentes a la corrosión como acero inoxidable, compuestos cerámicos de alta resistencia o sintéticos, similares al polietileno (Martínez, 1998). Un esquema de inyección con bomba auxiliar típica se muestra en la Figura 2.8.



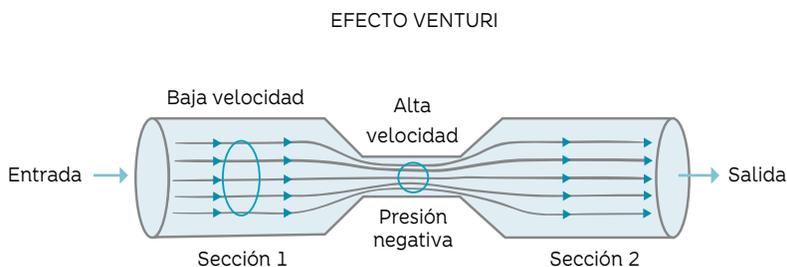
► FIGURA 2.8. Bomba de inyección en fertirriego: esquema y estación de campo.

Conexión a la succión de la bomba de riego

La tubería del sistema de inyección de fertilizantes se conecta a la tubería de succión de la bomba de riego, donde se instala una válvula de cheque para evitar la contaminación en la fuente por retorno del agua de riego. El programa de lavado de sistema debe cumplirse de forma estricta, antes y después de cada fertirriego, para evitar la corrosión de componentes del sistema de bombeo.

Inyector venturi

El venturi o vénturi es un dispositivo hidráulico formado por dos embudos unidos en la parte angosta. Al pasar por la garganta, el agua aumenta su velocidad y provoca una presión negativa que es aprovechada para inyectar una solución madre en ese punto (Figura 2.9).

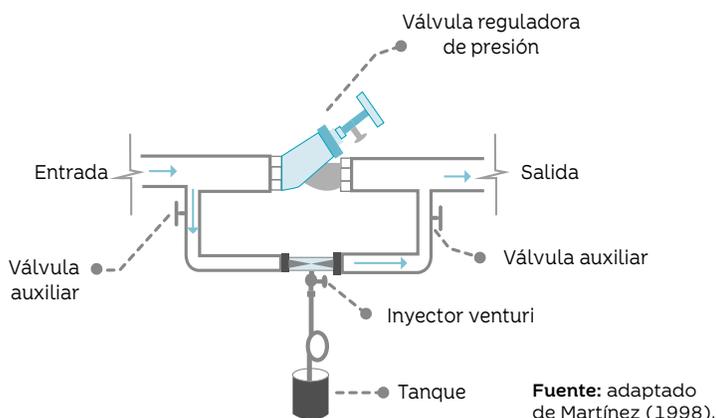


► FIGURA 2.9. Esquema de un inyector tipo venturi.

La pérdida de presión es uno de los limitantes en este sistema, por lo cual el margen de operación es muy limitado.

La pérdida de energía que provoca la instalación y operación del venturi debe ser calculada en forma precisa durante el proceso de diseño del sistema de riego, para ello se debe consultar la hoja técnica del producto ya que la pérdida de carga la constituye la diferencia entre la presión de entrada y la presión de salida del dispositivo. La selección del modelo apropiado requiere como parámetros: presión de entrada, presión de salida y caudal de succión.

En el rango de poca pérdida de presión (6–10 metros de columna-de agua, m.c.a.), el caudal de inyección es muy bajo. Se recomienda no implementar inyectores tipo venturi en sistemas de riego que funcionan con presiones inferiores a 30 m.c.a. a la entrada del sistema de filtros o que riegan áreas ubicadas sobre la cota del cabezal de riego. El inyector se instala en paralelo a la tubería de descarga de la bomba de riego, con frecuencia en una tubería secundaria. Para disminuir la presión en la tubería se utiliza una válvula tipo compuerta o mariposa (Figura 2.10), un filtro de malla o una válvula reguladora de presión.

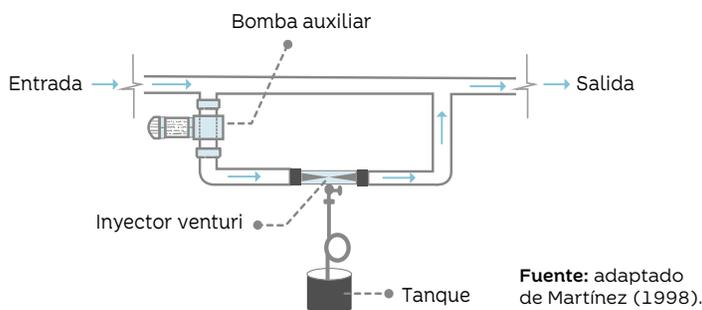


► **FIGURA 2.10.** Diseño de un sistema venturi modificado para la aplicación de fertilizantes en riego por goteo: esquema y estación de campo.

La operación del inyector comienza con la apertura de las dos válvulas auxiliares, una instalada a la entrada del venturi y la otra, a la salida. Para lograr succión se debe cerrar parcialmente la válvula reguladora de presión hasta que se haya conseguido el flujo de succión propio del dispositivo. El cierre de la válvula más allá de ese punto solo provocará la disminución de la presión en el sistema de riego. Para terminar la operación, basta con abrir totalmente la válvula reguladora de presión y cerrar totalmente una de las válvulas auxiliares.

Venturi más bomba auxiliar

El trabajo con el caudal nominal del inyector o caudal máximo exige una alta diferencia de presión entre la entrada y la salida del flujo. En la práctica esto se consigue instalando el inyector asociado a una bomba auxiliar, como se muestra en la Figura 2.11.



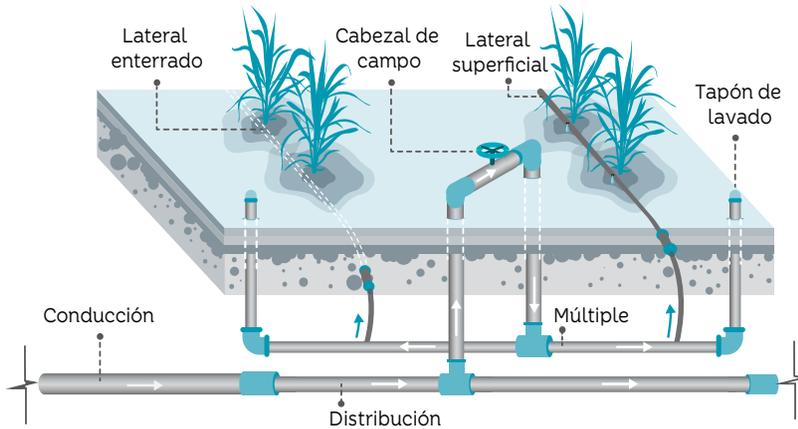
► **FIGURA 2.11.** Esquema de instalación de bomba auxiliar en tubería secundaria en un sistema venturi.

Venturi en paralelo y retorno a la succión

Incluye la conexión de una tubería de retorno descarga-succión y el uso de un venturi sobre ella, con lo cual se consigue una caída fuerte de presión en el retorno que facilita la inyección de la solución fertilizante. Sin embargo, como en el caso de la conexión a la tubería de succión de la bomba, es necesario tomar precauciones para no contaminar la fuente de agua con residuos fertilizantes; esto se logra instalando una válvula cheque en la tubería de succión, además de un lavado del sistema con agua limpia al final del evento de fertirriego para prevenir la corrosión en las partes de la bomba en contacto con sales fertilizantes durante períodos prolongados.

Red de tuberías

La función de la red de tuberías es transportar el agua desde la fuente hasta los sitios de aplicación; la red puede estar compuesta por algunas de las siguientes tuberías o por todas ellas: conducción, distribución, múltiples y laterales (Figura 2.12).



► **FIGURA 2.12.** Esquema de una red de tuberías en un sistema de riego por goteo.

Conducción

La tubería de conducción transporta el agua desde la fuente hasta la cabecera del área de riego; su diámetro está en función del caudal por transportar. La instalación puede obedecer a dos situaciones: por bombeo o por gravedad. Cuando la conducción es por gravedad se busca una presión lo más constante posible en los puntos de entrega de agua a las diferentes tuberías de distribución, lo cual se consigue con la instalación de tramos de tubería de diámetro ajustado a la pendiente del terreno, a fin de garantizar la misma presión a los diferentes sectores de riego.

Distribución

Las tuberías de distribución llevan el agua desde la conducción hasta los diferentes lotes o sectores de riego, donde la entregan a los múltiples mediante los cabezales de campo, cuyo principal elemento es la válvula que permite o suspende el paso del agua.

Múltiples

Desde el punto de vista hidráulico, los múltiples son tuberías de salida múltiple que reciben el agua de la tubería de distribución a través del cabezal de campo y la entregan a los laterales de goteo.

Laterales

Al igual que los múltiples, los laterales son tuberías de salida múltiple, de diámetro pequeño y con un caudal y una velocidad de flujo decrecientes en su recorrido. Se usan para aplicar el agua al suelo mediante emisores (goteros), dispositivos que pueden hacer parte integral del lateral o deben ser instalados en él.

Recientemente las cintas de riego han ganado terreno para los cultivos en hileras, como la caña de azúcar, debido al bajo costo y a la facilidad de instalación. Las cintas presentan gran variedad de caudales por gotero y de distancias entre ellos, así como diversos diámetros y calibres, los cuales deben ser seleccionados en función de la presión del sistema y la tasa de aplicación deseada.

En el sistema de riego por goteo subterráneo (SDI, por sus siglas en inglés: *Subsurface Drip Irrigation*) todos los componentes se instalan bajo la superficie del suelo.



Goteros

Son el componente más importante del sistema de riego por goteo, ya que dosifican el caudal y de su calidad depende, en gran parte, la uniformidad del riego. Normalmente tienen capacidad para aplicar un caudal nominal entre 2 L/h y 12 L/h, a una presión estándar de 1 atm o 10 m.c.a. Están regulados por la ecuación del gotero (Ecuación 2.1) que es de tipo potencial y expresa la relación entre la presión y el caudal; debe ser suministrada por el fabricante.

$$q = c * h^x \quad (2.1)$$

donde,

q es el caudal del gotero, en litros por hora (L/h),

c es la constante del gotero, sus unidades dependen de las unidades del caudal y la presión utilizadas,

h es la presión a la cual está funcionando el gotero y
 x es el exponente del gotero.

Cuando el fabricante no suministra la ecuación del gotero, esta se puede determinar mediante una regresión de tipo potencial entre varios pares de datos de presión y caudal. Cuando solo se requiere una determinación aproximada, es suficiente disponer de sendos pares de datos de presión y caudal (h_1, q_1) ; (h_2, q_2) para determinar x y c .

$$q_1 = c * h_1^x; q_2 = c * h_2^x; \frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^x; \text{ tomando logaritmos:}$$

$$\log\left(\frac{q_1}{q_2}\right) = x * \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right);$$

$$x = \frac{\log\left(\frac{q_1}{q_2}\right)}{\log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)}; c, \text{ se obtiene de:}$$

$$c = \frac{q_1}{h_1^x}, \text{ o } c = \frac{q_2}{h_2^x}$$

El exponente, que varía teóricamente entre 0 y 1, permite interpretar la capacidad de regulación del caudal del gotero, ya que si x es cercano o igual a 0, para cualquier presión el caudal es constante, siendo este el caso de los goteros autocompensados; si x es cercano a 0.5, como ocurre con la mayoría de los goteros no autocompensados, indica que el caudal varía con la raíz cuadrada de la presión y estos goteros trabajan en flujo turbulento; si x es 1, indica una relación lineal entre caudal y presión, el régimen de flujo es laminar y por tanto, estos goteros tienen baja capacidad de regulación de caudal.

El valor de x incide también en las diferencias de presión admisibles en un sector de riego, con base en la regla: en un sector de riego la diferencia relativa de caudal debe ser $\leq 10\%$ (0.1) del caudal medio del gotero. Derivando la ecuación del gotero con respecto a h , se tiene:

$$dq = x * c * h^{x-1} * dh$$

$$dq = x * c * h^x * \frac{dh}{h}$$

$$dq = x * q * \frac{dh}{h}$$

$$\frac{dq}{q} = x * \frac{dh}{h} ; \text{ Si } \frac{dq}{q} = 0.1; \text{ entonces:}$$

$$\frac{dh}{h} = \frac{0.1}{x} \quad (2.2)$$

La Ecuación 2.2 permite establecer las diferencias relativas de presión en un sector de riego a partir de la diferencia relativa de caudal permitida del $dq/q = 0.1$ y del exponente del gotero (Cuadro 2.2).

► **CUADRO 2.2.** Variación relativa de presión en función de la variación relativa de caudal del 10%, para un valor dado de x .

Exponente del gotero (x)	Presión del gotero (dh/h)
0	∞
0.25	0.40
0.50	0.20
0.75	0.13
1.00	1.00

Por ejemplo, si el sistema de riego se diseña para operar en el sector menos favorable del lote por distancia o lejanía a la fuente o irregularidades internas del terreno, con una presión de 10 m y un exponente de gotero de 0.5, entonces la diferencia relativa de presión es de 0.2 y la diferencia de presión admisible es de 2 m ($0.2 * 10$ m); con un gotero de mayor regulación, $x = 0.4$, la diferencia de presión admisible sería de 2.5 m.

Coeficiente de variación del gotero, C_v

El coeficiente de variación del gotero es una medida de calidad (Cuadro 2.3) y debe ser determinado y suministrado por el fabricante. Se calcula como la relación entre la desviación estándar de los caudales (s) y el caudal promedio (q_{prom}) de una muestra de goteros sometidos a una presión nominal que normalmente es de 1 atm o 10 m.c.a.

$$C_v = \frac{s}{q_{prom}} \quad (2.3)$$

► **CUADRO 2.3.** Clasificación de la calidad de los goteros según su coeficiente de variación.

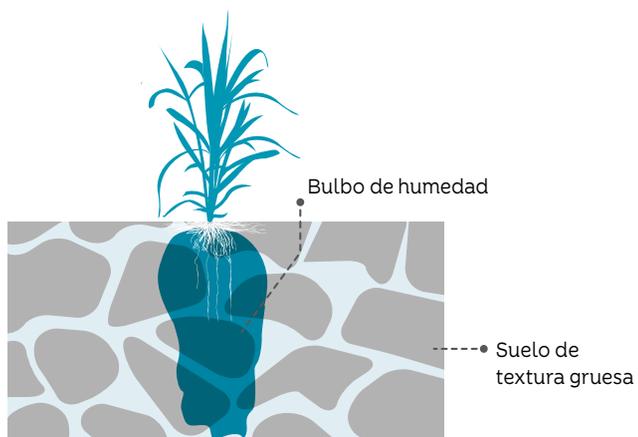
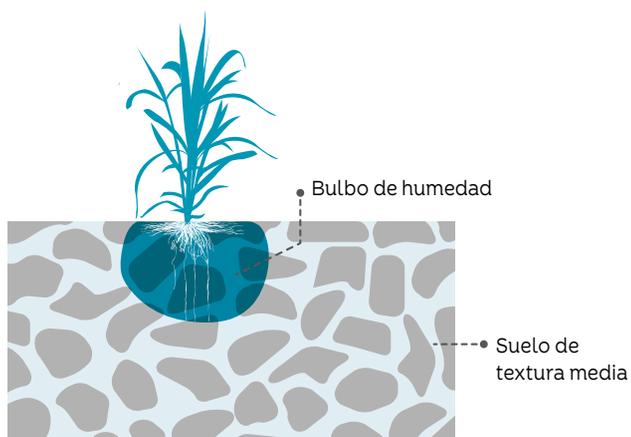
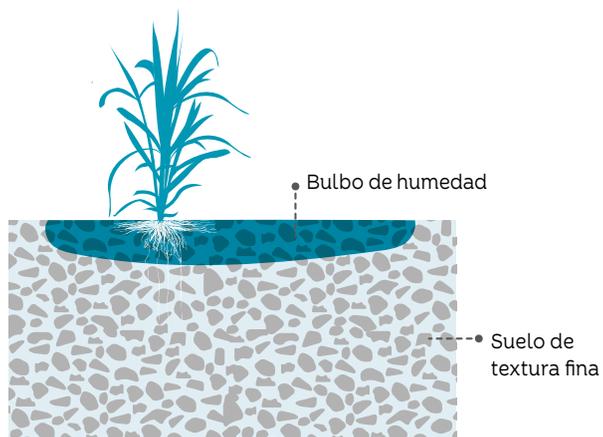
Coeficiente de variación (C_v)	Clasificación
<0.05	Excelente
0.05 – 0.10	Promedio
0.10 – 0.15	Marginal
>0.15	No aceptable

Fuente: tomado de ASAE EP405.1 (1998, R2014).

Bulbo de humedad

El agua aplicada por el gotero sobre la superficie del suelo se distribuye en el perfil obedeciendo a las fuerzas capilares y gravitacionales para formar el bulbo de humedad. Cuando los goteros se encuentran a corta distancia uno de otro a lo largo de la línea de aplicación, como sucede en el cultivo de caña de azúcar cuando se utilizan cintas de goteo, se forman franjas continuas húmedas debido a la unión de los bulbos de goteo consecutivos. Estas franjas aparecen intercaladas con franjas secas en los centros de las hileras del cultivo, lo cual en épocas secas contribuye a reducir la invasión de malezas.

La forma del bulbo (Figura 2.13) es determinada principalmente por la textura del suelo y su estratificación y tamaño, por el volumen de agua aplicado y por el caudal del gotero; así, en suelos finos de baja conductividad hidráulica vertical, en algunos casos provocada por procesos de compactación, el bulbo tiene un mayor desarrollo horizontal y forma franjas húmedas anchas; en suelos de textura gruesa, con altas tasas de infiltración y conductividad hidráulica vertical, estas franjas presentan un mayor desarrollo en profundidad, con riesgos de pérdidas de agua por percolación; en suelos finos recién preparados, dependiendo de la calidad de la preparación y la presencia de agregados de gran tamaño, el bulbo húmedo puede tener una forma similar a la que ocurre en suelos de textura gruesa. En el bulbo húmedo es posible diferenciar, además, la zona de acumulación de sales y el frente de humedecimiento en sus bordes.



► FIGURA 2.13. Formas del bulbo de humedad según la textura del suelo.



Ventajas y desventajas del riego por goteo

Entre las principales ventajas del riego por goteo se puede mencionar la creación de un ambiente radical equilibrado en la relación agua–aire debido a que el riego frecuente ayuda a mantener bajas tensiones de humedad en la zona radical, lo cual finalmente se refleja en la mayor productividad de los cultivos. El ambiente radical equilibrado se logra cuando el suelo se mantiene a capacidad de campo.

Otra ventaja del sistema de riego por goteo es la posibilidad de utilizarlo como medio para realizar la aplicación uniforme de fertilizantes en solución de acuerdo con la demanda del cultivo. El sistema se adapta a gran diversidad de cultivos, sistemas de cultivo y condiciones topográficas.

El principal inconveniente es el taponamiento potencial de tuberías y goteros como consecuencia del uso de aguas de calidad inadecuada y sin el tratamiento necesario. En general, en el valle del río Cauca la calidad del agua superficial es menor que la del agua subterránea, sobre todo por contaminación con material orgánico y sólidos en suspensión. No obstante, el agua subterránea puede tener contenidos altos de carbonatos y bicarbonatos, así como hierro y manganeso, que favorecen a la proliferación de bacterias cuyos exudados (babas) obturan continuamente los filtros, la red de tuberías y los goteros (Medina, 1995; citado por Marín B. L., 2011).

Algunas ventajas del sistema de riego por goteo subterráneo sobre el sistema de goteo superficial:

- La evaporación del suelo, la escorrentía superficial y la percolación profunda se reducen o eliminan en gran medida.
- La infiltración y el almacenamiento de la precipitación estacional pueden ser mejorados por suelos más secos y con menos costras.
- En cultivos ampliamente espaciados se puede humedecer una fracción más pequeña del volumen del suelo, lo que reduce aún más las pérdidas innecesarias de agua de riego.
- Es menor el crecimiento de arvenses en el campo de cultivo.
- La variabilidad en los cambios de agua del suelo y la redistribución se reducen a menudo con el sistema de riego por goteo subterráneo en comparación con el goteo superficial.

- Las instalaciones pueden tener una vida útil más larga, con la posibilidad de que permite amortizar los costos de la inversión en un plazo mayor.
- El daño por plagas y animales puede ser menor, pero su detección y reparación pueden requerir más esfuerzo (Lamm, 2002).



Laterales enterrados en un sistema de riego por goteo subterráneo (SDI).

Otras consideraciones acerca del riego por goteo subterráneo:

- La inversión inicial depende del tamaño, la forma, la fuente de agua y la automatización del sistema.
- El sistema requiere maquinaria y mano de obra más calificada que la mayoría de los sistemas de riego.
- El uso del sistema durante la etapa de germinación del cultivo de caña de azúcar puede ser limitado, dependiendo de la profundidad de la instalación y las características del suelo.
- La salinidad puede aumentar por encima de la línea de goteo, con riesgo de daño para las plántulas emergentes o trasplantadas.
- Las fugas causadas como consecuencia de daños por roedores son difíciles de localizar y reparar.
- Las líneas de goteo deben ser monitoreadas frecuentemente para identificar perforaciones y daños, y lavadas con frecuencia para eliminar las acumulaciones de limo y otros precipitados (Lamm, 2002).
- Los errores de diseño son más difíciles de corregir en el sistema de riego subterráneo.
- Si se produce vacío al cerrar el sistema, existe la posibilidad de ingreso de suelo a las tuberías, por lo que es necesario instalar dispositivos de alivio para evitar la presión del aire. En algunos suelos y en algunas profundidades puede ocurrir el fenómeno de compresión de la línea de goteo, lo que causa efectos adversos en el flujo.
- Cuando el sistema no se utiliza por períodos prolongados, puede ocurrir daño ambiental en el subsuelo sobre las tuberías de goteo (Lamm, 2002).
- Aunque los daños por malezas y plagas se reducen, cuando ocurren son más difíciles de detectar que en el sistema de goteo sobre la superficie (Lamm, 2002).

Referencias

- American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASAE. (1988). *ASAE Standard EP405.1: Design and Installation of Microirrigation Systems*. Recuperado 26 Jun, 2018 de <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=2&AID=32022&CID=s2000&T=2>
- Igunnu, E. y Chen, G. (2012). *Produced water treatment technologies*. Recuperado 26 Jun, 2018 de https://www.researchgate.net/publication/235971711_Open_Access_Produced_water_treatment_technologies
- Keller, J. y Bliesner, R.D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. New Jersey: The Blackburn Press.
- Lamm, F.R. (2002). *Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation*. Recuperado 26 Jun, 2018 de https://www.researchgate.net/publication/228854922_Advantages_and_Disadvantages_of_Subsurface_Drip_Irrigation
- Marín B., L.M. (2011). *Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en grava*. (Trabajo de grado de Maestría). Recuperado abril 25, 2018, de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7908/1/CB-0450286.pdf>
- Martínez, L. (2001). *Manual de operación y mantenimiento de equipos de riego presurizado*. Recuperado 26 Jun, 2018 de <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/es/NR28083.pdf>
- Medina, J.A. (1979). *Riego por goteo. Teoría y práctica*. Madrid: Ediciones Mundi-prensa
- Zúñiga, E. (2004). *Diseño y evaluación del riego a presión*. San José: Universidad de Costa Rica.

Símbolos y abreviaturas

c	Constante del gotero
C_v	Coficiente de variación del caudal de un gotero
h	Presión de trabajo del gotero
q	Caudal del gotero, caudal aplicado por un gotero
q_{prom}	Caudal promedio de una muestra de goteros
RLAF	Riego Localizado de Alta Frecuencia
s	Desviación estándar de caudales de una muestra de goteros
SDI	Riego por goteo subterráneo (<i>Subsurface Drip Irrigation</i>)
x	Exponente del gotero

Introducción

La planificación de un sistema de riego tiene como principal objetivo obtener el caudal requerido en función del área a regar; para ello es necesario considerar las condiciones de instalación, operación y eficiencia con el fin de obtener el mayor beneficio de la inversión y prever sus posibles limitaciones.

El caudal requerido se debe cotejar con la disponibilidad de agua en el predio para establecer los límites de la inversión teniendo en cuenta solo las áreas donde exista suficiente agua para alimentar el sistema. En otras palabras, la inversión en riego por goteo debe limitarse al área que es posible regar con el agua disponible.

En la planificación se verifican las condiciones del entorno, las cuales influyen en parámetros como los tiempos de riego y el número de sectores en que se debe dividir el predio para la operación, evaluación y mantenimiento del sistema.



Condiciones del entorno

Una correcta planificación de un sistema de riego por goteo debe considerar las condiciones del entorno y el cultivo en el cual será operado, entre ellas, las condiciones topográficas, el tipo de suelo, las necesidades de agua del cultivo de acuerdo con su edad, la calidad del agua de riego, las posibles modificaciones al diseño de campo existente, la preparación del suelo y la eficiencia esperada del sistema.

Topografía

Las condiciones topográficas del terreno son fundamentales para garantizar una mayor eficiencia en el uso del agua y la aplicación uniforme del riego. La topografía regular y la nivelación de precisión facilitan la disposición en campo de los componentes del sistema. Se sugiere trabajar sobre mapas actualizados con curvas de nivel cada 20 cm y en escalas mayores que 1:5000.

Pendiente del terreno

También conocida como gradiente de la superficie, se determina a partir de las curvas de nivel descritas en el mapa topográfico. Con base en la clasificación de la FAO (2009) (Cuadro 3.1) y de acuerdo con IGAC y CVC (2004), la mayor parte de las tierras del valle geográfico del río Cauca se encuentran en relieves planos y con pendientes menores al 3%, incluida la parte baja del piedemonte.

► **CUADRO 3.1.** Clases y clasificación de gradientes de pendientes.

Clase	Clasificación	(%)
1	Plano	0 – 0.2
2	Nivel	0.2 – 0.5
3	Cercano al nivel	0.5 – 1.0
4	Muy ligeramente inclinado	1.0 – 2.0
5	Ligeramente inclinado	2.0 – 5.0
6	Inclinado	5 – 10
7	Fuertemente inclinado	10 – 15
8	Moderadamente escarpado	15 – 30
9	Escarpado	30 – 60
10	Muy escarpado	>60

Fuente: tomado de FAO (2009).

Suelos

El riego por goteo es aplicable en terrenos con una gran variedad de pendientes y texturas de suelos. Los cultivadores de caña de azúcar del valle del río Cauca cuentan con estudios detallados de suelos, de consulta obligada antes de emprender la instalación de cualquier sistema de riego. Cenicaña, a través de su Geoportal (www.cenicana.org) ofrece información de los suelos identificados en los estudios detallados, incluidos el nombre técnico y el común, el área que cubren, la familia textural, la descripción del perfil y las propiedades físicas y químicas.

Familia textural

Está definida por los porcentajes de arcilla, limo y arena que se encuentran en la sección control, complementados con los contenidos de grava.

La familia textural indica la forma en que se desarrolla el bulbo húmedo en el perfil del suelo y tiene significado en el espaciamiento entre goteros al escoger una cinta de riego o tubería.

Según el estudio detallado de suelos, en áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca se detectaron 35 familias texturales, entre las cuales 13 correspondieron a clases de familias texturales homogéneas y 22 a familias mezcladas o contrastantes (Quintero, 2008).

Contenido de grava, C_g

Los suelos del piedemonte en el valle del río Cauca (Cuadro 3.2), formados por deposiciones sucesivas de materiales provenientes de las cordilleras, poseen altos contenidos de grava que afectan directamente su capacidad de retención de humedad e indirectamente otros parámetros como la frecuencia de riego; por esta razón es necesario evaluar el contenido de grava con el fin de descontar su volumen del volumen total de suelo.

Según la FAO (2009), la presencia de fragmentos rocosos influye en la disponibilidad de nutrimentos, el movimiento del agua y el manejo del suelo, así como en su origen y estado de desarrollo.

Perfil del suelo

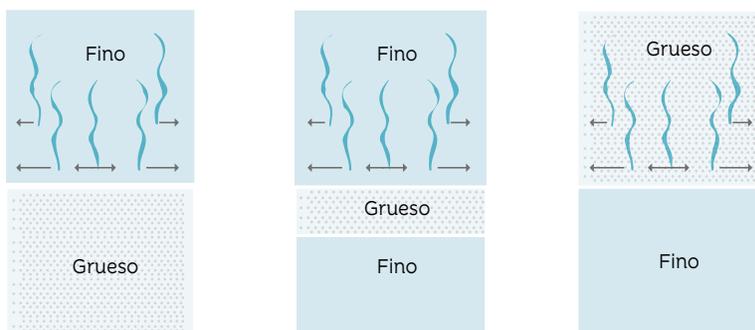
La presencia de suelos de texturas gruesas dificulta el desarrollo horizontal de los bulbos de humedad. En suelos estratificados (Figura 3.1) con horizontes superficiales de texturas finas sobre horizontes de texturas gruesas, los bulbos de humedad presentan formas irregulares; fenómeno que se explica mediante la Segunda Ley de Movimiento del

► **CUADRO 3.2.** Porcentaje de fragmentos rocosos en algunos suelos de piedemonte del valle del río Cauca.

HACIENDA	SUELOS				
	Consociación	Clasificación taxonómica	Familia textural	Profundidad (cm)	Roca (%)
Los Ranchos	Italia	Typic Argiustoll	Arcillosa sobre esquelética arcillosa	0 – 30	9.4
	Acuario	Typic Haplustoll	Esquelética francosa	0 – 30	18.6
Vallecito	Nima	Entic Haplustoll	Francosa fina sobre esquelética arenosa	0 – 40	26
El Recreo	Nima	Entic Haplustoll	Francosa fina sobre esquelética arenosa	0 – 30	27.2
				>30	65
El Reporte	Arroyo	Udertic Haplustoll	Fina	0 – 30	1.6
El Waco	Santa Elena	Entic Haplustoll	Esquelética arcillosa	0 – 30	12.4
Lorena	Esneda	Typic Haplustert	Arcillosa sobre esquelética arcillosa	0 – 20	9.4
				20 – 40	21.9

Agua: el flujo del agua a través de la interfase aire-agua solo ocurre cuando el potencial de presión es >0 y es suficiente para superar la tensión superficial del fluido. Los cambios en la textura del suelo actúan como una barrera temporal al movimiento del agua en el suelo. “Suelo fino reposando sobre suelo grueso, o viceversa, tiene que estar muy húmedo antes de que el agua se mueva hacia abajo a través del subsuelo. En estas condiciones, el suelo suprayacente llega a contener hasta tres veces más agua que la que pudiera contener en suelos más uniformes. Si usted tiene distintos horizontes, debe monitorear la humedad de cada horizonte separadamente” (USDA y NRCS, 1997)¹ (Figura 3.1).

1. Cita original: “*Fine soil overlying a coarse soil, or vice versa, must become very wet before water will move down through the subsoil. Under these conditions, the overlying soil holds up to three times as much water as it would in more uniform soils. If you have distinct layers or soil, you may want to monitor soil moisture in each layer separately.*”



► **FIGURA 3.1.** Movimiento del agua en suelos estratificados.

Fuente: tomado de USDA y NRCS (1997).

Profundidad del primer horizonte

También conocido como horizonte A, condiciona el almacenamiento del agua y la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento y la producción de los cultivos. Cuando es removido durante las labores de preparación y adecuación del suelo, ocurren pérdidas de fertilidad y capacidad de retención de agua que afectan el contenido de carbono orgánico y la productividad.

Propiedades químicas

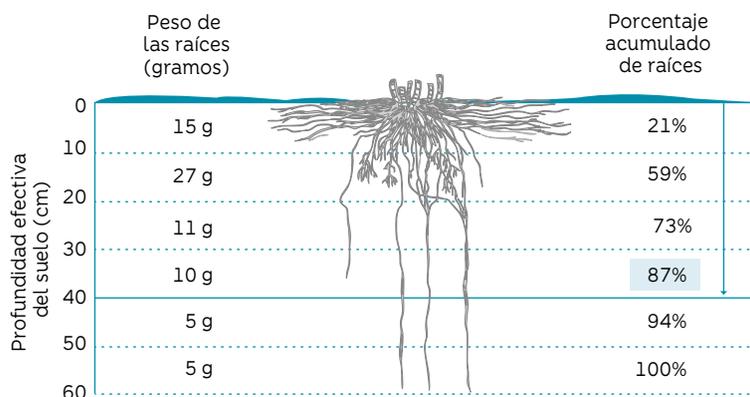
Son cualidades del suelo de primer orden en las decisiones de riego y fertilización. En laboratorio se determina capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, elementos mayores y menores, acumulación de sales disueltas en la solución del suelo, sodio intercambiable, saturación de bases, carbono orgánico, carbonato de calcio y carbonato de sodio, entre otras.

Cultivo

Profundidad efectiva, d_t

Se define como aquella profundidad hasta donde penetran las raíces de las plantas sin obstáculos físicos ni químicos y depende de las condiciones de drenaje natural, la presencia de horizontes argílicos o compactados, la ocurrencia de cambios texturales abruptos, la presencia de fragmentos gruesos y contenidos excesivos de sales de sodio y aluminio, entre otros (Quintero *et al.*, 2008). Es la profundidad de penetración de las raíces hasta donde la planta hace uso del agua almacenada en el suelo, todo ello en función de la especie, la estratificación del perfil del suelo y la profundidad del nivel freático; según la profundidad efectiva, las plantas se clasi-

fican como: de raíz superficial, $d_t < 60$ cm; de raíz media, $60 \text{ cm} < d_t < 120$ cm; y de raíz profunda, $d_t > 120$ cm. En la Figura 3.2 se muestra el esquema del desarrollo de raíces de una planta de caña de azúcar adulta en un suelo de piedemonte.



► **FIGURA 3.2.** Esquema de distribución de raíces en una planta de caña de azúcar en el piedemonte, suelo Italia, Typic Argiustoll, familia textural arcillosa sobre esquelética arcillosa. Valle del Cauca, Colombia.

Fuente: tomado de Campos y Cruz (2014).

La caña de azúcar demanda cantidades de agua diferentes de acuerdo con su edad, y en función del desarrollo radical y foliar. Se ha establecido que entre los 4 y los 8 meses de edad se presenta el período de rápido crecimiento de la planta, tiempo durante el cual el cultivo es más sensible al suministro de agua.

Patrón de extracción de humedad

Se estima que las plantas extraen humedad del perfil del suelo de manera diferencial, según la profundidad de las raíces; así, se considera que el 40% de la humedad se extrae del primer cuarto de dicha profundidad, el 30% del segundo, el 20% del tercero y el 10% restante del cuarto.

Necesidad de agua

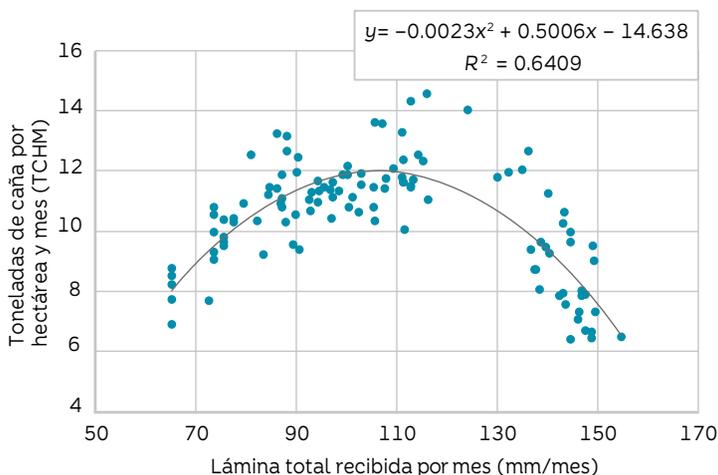
Como se sabe, las plantas requieren un suministro adecuado de agua para realizar sus funciones de desarrollo y producción y para balancear las pérdidas por transpiración y evaporación a la atmósfera. En las plantas, el agua se encuentra como agua de constitución de los tejidos (C) y en la forma de circulación o transpiración (T), y evaporación (E). Con base en estas formas, el agua se considera como uso consuntivo ($UC = E + T + C$) y evapotranspiración ($ET = E + T$). Según Penman,

citado por Chang (1971), la evapotranspiración potencial (ET_o) es la cantidad de agua transpirada en la unidad de tiempo por un cultivo verde y corto que cubre completamente el suelo, de altura uniforme y sin escasez de agua disponible en el suelo. La ET_o es determinada por la radiación, la velocidad del viento y la humedad relativa.

La transpiración difiere de la evaporación desde una superficie libre y, aunque mantiene la misma tendencia, es menor debido al mayor albedo de la vegetación y a la regulación de pérdida de agua por los estomas de la planta (Chang, 1971). El albedo es la relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente en el espectro visible, y depende, principalmente, del color y la rugosidad de la superficie.

La evapotranspiración real (ET_c) es aquella que sucede efectivamente en un cultivo en condiciones normales de crecimiento; si la humedad del suelo es alta, entonces, $ET_c = ET_o$ y, en la medida que el suelo pierde humedad, $ET_c < ET_o$.

Cenicaña, mediante experimentos diseñados para el efecto, ha determinado la respuesta en productividad de la caña de azúcar, variedad CC 93-4418 (Campos y Cruz, 2016), a la lámina neta de agua recibida, incluidas las provenientes de la precipitación efectiva, el aporte capilar y el riego. La Figura 3.3 muestra la curva de tendencia resultante al agrupar los resultados en toneladas de caña por hectárea y mes (TCHM) obtenidos con las variedades CC 85-92, CC 93-4418 y CC 01-1228, a diferentes láminas netas mensuales recibidas, que para una edad de corte de 13 meses equivalen a 1400 mm, valor comparable al reportado por Cenicaña (1984) de 1050 mm a 1300 mm por ciclo.



► **FIGURA 3.3.** Respuesta de la caña al agua.

Fuente: tomado de Cenicaña (2015).

Calidad del agua

Como parte de la planificación previa al diseño de un sistema de riego por goteo se determina la calidad del agua en la fuente seleccionada, la cual puede ser superficial o subterránea. El agua de ambas fuentes con frecuencia contiene iones de cloro, hierro, azufre y manganeso; estos elementos ofrecen un medio favorable para la proliferación bacterias productoras de un lodo o 'baba' que se adhiere a las mallas en los sitios de captación.

De acuerdo con Medina (1995) citado por Marín (2011) en el Valle del Cauca el 85% de los pozos captan agua con altas concentraciones de hierro (0.6–5.0 mg/L) y manganeso (<1 mg/L), las mayores en zonas de Jamundí, Candelaria, El Hormiguero, norte de Cartago y oriente de Zarzal.

Se puede afirmar que en el valle del río Cauca el agua superficial muestra tendencia a pH ácido y mayor contenido de material orgánico e inorgánico fino en suspensión que el agua subterránea, la cual presenta tendencia alcalina y mayor contenido de arenas y sales, especialmente carbonatos.

Características físicas

El agua de riego está caracterizada físicamente por contener partículas sólidas en suspensión; según su tamaño, estas partículas se clasifican en arena, limo y arcilla, y en materiales de erosión acumulados en embalses y residuos provenientes de canales. Dependiendo del tamaño de las partículas, para su control es posible utilizar uno o varios tipos de filtros combinados (Cuadro 3.3).

► **CUADRO 3.3.** Filtro recomendado según el tamaño de partículas presentes en el agua de riego.

Tipo de partícula	Filtro de arena	Filtro hidrociclón	Filtros de malla	Filtros de anillos
Arenas	x	✓	✓	✓
Limos y arcillas	✓	x	✓	✓
Sustancias orgánicas	✓	x	✓	✓

✓ Recomendado x No recomendado

Cuando el agua presenta un alto volumen de materiales en suspensión es necesario realizar un tratamiento previo al sistema de filtros, utilizando un sedimentador o decantador diseñado para el efecto; la construcción y el uso de un reservorio ha dado buenos resultados. En el caso de toma de pozos profundos, cuando hay presencia de arena, se recomienda la instalación de un hidrociclón; en presencia de materiales finos en suspensión, acompañados de materia orgánica, se debe instalar un sistema compuesto de un filtro de arena seguido de un filtro de malla o un filtro de anillos.

Características químicas

La concentración de sólidos totales disueltos en el agua de riego es un parámetro de calidad que indica el grado de salinidad del agua mediante la determinación de su conductividad eléctrica. Algunas sales minerales disueltas en el agua en altas concentraciones pueden causar corrosión y obstrucción en los sistemas de distribución y en las tuberías de riego, así como efectos adversos en los suelos y los cultivos.

Concentración de sales y conductividad eléctrica. Con base en el principio de que la conductividad eléctrica de una disolución es proporcional al contenido de sales disueltas ionizadas contenidas en esa disolución, la determinación de la concentración de sales en el agua de riego se realiza a partir de la medición de la conductividad eléctrica del agua y de acuerdo con la siguiente Ecuación 3.1:

$$STD = CE * 640 \quad (3.1)$$

donde, *STD* es la concentración de sólidos totales disueltos y *CE* es la conductividad eléctrica del agua a 25 °C. Las unidades de medida usuales para *CE* son deciSiemens por metro (dS/m) y microSiemens por centímetro (μS/cm), antes miliohmio por metro (mohm/m). Los *STD* se expresan en partes por millón (ppm). La conversión es ppm = *CE* dS/m * 640. El número representa el peso equivalente (*pe*) de los iones presentes en la muestra de agua, un valor práctico cuando no se tiene el peso molar específico. El *pe* en gramos o miligramos por litro (g/L, mg/L) se convierte al peso miliequivalente por litro (meq/L), de modo que ppm/*pe* = mg/(L * *pe*) = meq/L.

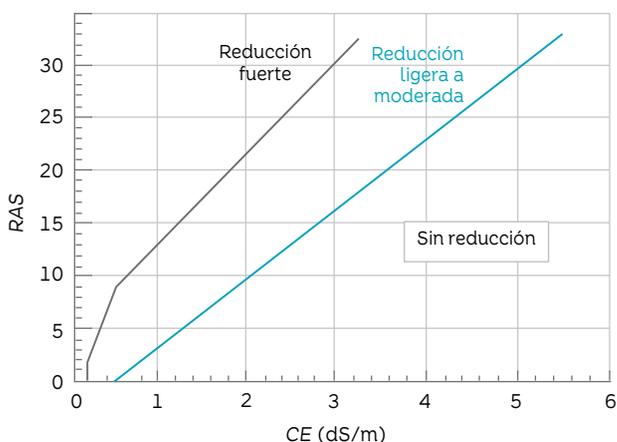
Lo ideal para riego es que el agua contenga proporciones similares de aniones y cationes, con un error admisible de 5% por exceso o por defecto. El contenido de sales y su distribución en el agua de riego deben ser determinados en la planeación del sistema de riego y con cierta frecuencia durante su operación. Junto con la determinación

de sales en la solución del suelo constituye un insumo importante de información para las decisiones y el manejo del programa de fertirrigación en el cultivo de la caña de azúcar.

Tasa de infiltración y relación de absorción de sodio. En sitios donde la infiltración es baja (<3 mm/h) es posible que las plantas no encuentren disponible la cantidad de agua suficiente para llenar sus requerimientos y el desarrollo de las raíces puede verse limitado por la formación de capas endurecidas y la poca aireación del suelo. Para evaluar los problemas de infiltración provocados por la mala calidad del agua de riego se utiliza la relación de absorción de sodio (*RAS*), un índice que estima la proporción relativa de sodio (en la forma de Na^+) con respecto a la proporción de calcio (Ca^{2+}) y de magnesio (Mg^{2+}). La concentración de los elementos se expresa en meq/L (Ecuación 3.2).

$$RAS = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (3.2)$$

La Figura 3.4 ilustra los cambios en la reducción relativa de la tasa de infiltración en función de las condiciones dadas por los valores de la *RAS* y la conductividad eléctrica (*CE*) del agua de riego. El exceso de Na^+ desplaza Ca^{2+} y Mg^{2+} , con lo cual se afecta la estructura del suelo. La tasa de infiltración del agua en el suelo se reduce fuertemente si el agua de riego tiene baja concentración de *STD* y la *RAS* aumenta por exceso de Na^+ .



► **FIGURA 3.4.** Reducción relativa de la infiltración de agua en el suelo en función de la salinidad y la relación de absorción de sodio (*RAS*) del agua de riego.

Para determinar la relación de absorción de sodio después del riego se propone una $RAS_{\text{corregida}}$ (Ecuación 3.3) en la que la solución del suelo contiene minerales de Ca^{2+} en ausencia de precipitados de Mg^{2+} .

$$RAS_{\text{corregida}} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Cax^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (3.3)$$

donde, Cax^2 es la concentración final de calcio que permanece en la solución del suelo, teniendo en cuenta variables como la conductividad del agua aplicada, la relación entre contenidos de bicarbonato y calcio y la presión parcial de dióxido de carbono en el suelo.

El riego con agua rica en sales puede provocar la acumulación de sodio y la pérdida de calcio en los primeros centímetros de suelo, lo que favorece la dispersión de los agregados en partículas más pequeñas que terminan ocupando el espacio poroso. Esta condición afecta la permeabilidad del suelo y causa problemas de infiltración. El calcio y el magnesio contribuyen a la estructura del suelo, de modo que la falta de ellos reduce la velocidad de infiltración.

Aunque la velocidad de infiltración aumenta con la concentración de sales, excepto de sodio, también lo hace la presión osmótica de la solución del suelo y la planta tiene que hacer más esfuerzo de succión para absorber el agua por medio de las raíces (Yagüe, 1998). Los problemas de infiltración disminuyen con el manejo adecuado del riego. Cuando se pasa de un sistema de riego por surcos a un sistema de goteo o de aspersión hay más oportunidades de manejar la tasa de infiltración. El sistema de riego por goteo se adapta muy bien a los suelos dedicados a la producción de caña de azúcar en el valle del río Cauca, donde el 90% de ellos presenta homogeneidad textural y predominio de las familias texturales arcillosa muy fina, arcillosa fina, franca fina y franca gruesa (Quintero *et al.*, 2008).

Fracción de lavado. Es posible evitar la acumulación de sales en la zona radicular asegurando que la cantidad de sales desplazada por lixiviación o ´lavado´ sea igual a la cantidad de sales agregada con el agua de riego. El requerimiento de agua para lixiviación o lavado de sales (RL) es la fracción de riego que debe llegar a la zona radicular para desplazar las sales acumuladas en ella (Ecuación 3.4). El éxito depende de la salinidad del agua aplicada y de la tolerancia propia del cultivo. En el riego por goteo la fracción de lavado está determinada por:

$$RL = \frac{CE_a}{2_{m\acute{a}x}CE_e} \quad (3.4)$$

donde, CE_a es la CE del agua (dS/m); CE_e es la CE del extracto de saturación del suelo (dS/m), valor para el cual el descenso en producción es un porcentaje de la productividad máxima que se quiere conseguir; y $2_{m\acute{a}x}CE_e$ es el valor de CE_e en el cual el descenso de producción es del 100%.

La eficiencia de lavado varía con la textura del suelo, desde 30% en arcillosos hasta 100% en arenosos (Ecuación 3.5).

$$RL_{real} = \frac{RL_{neta}}{\text{Eficiencia de lavado}} \quad (3.5)$$

En el riego por goteo las sales se concentran principalmente en la superficie del suelo, desde el centro y hacia la periferia del bulbo húmedo formado por los emisores. En este sistema, el control de la salinidad se logra en el corto plazo porque la alta frecuencia de aplicación de agua permite el arrastre de sales hacia la periferia del bulbo; es por esto que es posible regar con aguas más salinas en el sistema de riego por goteo que en los demás sistemas.

A partir de referencias dadas por Steduto *et al.* (2012), la caña de azúcar muestra una sensibilidad moderada a la salinidad (Nelson y Ham, 2000) y se considera que valores de $CE_e < 20$ dS/m no afectan el crecimiento del cultivo, mientras en el rango de 30–40 dS/m los rendimientos disminuyen; $CE_e > 40$ dS/m es el umbral económico de producción (Rozeff, 1995). Por su parte, Yagüe (1998) reporta los siguientes porcentajes de pérdida según la CE_e (dS/m): 0% (1.7), 10% (3.4), 25% (5.9), 50% (10) y 100% (19).

🔹 Ejemplo. Con el fin de evitar un descenso en la producción de un cultivo de caña de azúcar se quiere calcular el requerimiento de lavado real de sales en un suelo es arcilloso con una eficiencia de lavado de 0.35. La conductividad eléctrica del agua de riego es de 1.5 dS/m y la del extracto de saturación del suelo para que no ocurra un descenso de la producción es de 1.7 dS/m.

Aplicando las Ecuaciones 3.4 y 3.5, $RL_{neta} = 1.5 / (2 * 19) = 0.04$ y $RL_{real} = 0.04 / 0.35 = 0.11$.

Se concluye que es necesario incrementar el tiempo de riego en 11% para cumplir con la fracción de lavado.

Características biológicas

Macroorganismos y microorganismos obstruyen los sistemas de riego. El agua almacenada en depósitos o aquella que corre por conductos descubiertos puede contener volúmenes altos de materia orgánica. Las condiciones ambientales en el sistema de riego favorecen el desarrollo y el rápido crecimiento de distintas especies de microorganismos. La materia orgánica en el agua de riego está formada por partículas parcialmente descompuestas de origen vegetal y organismos vivos como algas, bacterias y protozoarios unicelulares.

Muchos de estos microorganismos son formados por procesos de oxidación biológica y favorecen el desarrollo de depósitos de óxido de hierro y manganeso que hacen que aumente la obstrucción de las tuberías. Igualmente, los crustáceos, los peces y otros organismos pueden obstruir los sistemas de filtración. Para prevenir la ocurrencia de estos problemas se sugiere la instalación de filtros, bien sea de anillos o de malla. Cuando hay presencia de algas y microorganismos se debe hacer un tratamiento químico seguido de filtrado.

Diseño de campo

La cosecha mecanizada y la aplicación de riego por goteo en el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca exigen cambios en los diseños de campo que han sido trazados para riego por gravedad. El riego por goteo funciona a presión y es menos limitado por la topografía del terreno que otros sistemas, tolera pequeñas diferencias de nivel en la extensión del surco de siembra sin que se produzca una interrupción del flujo de agua a lo largo del lateral ni cambios significativos en el caudal; teniendo en cuenta la cosecha mecanizada, es posible utilizar longitudes de surco continuas, de tal manera que al final del recorrido se llegue, por ejemplo, con un vagón de autovolteo totalmente cargado, lo cual reduce el tránsito excesivo de equipos en el campo y evita los problemas de compactación del suelo y pérdidas de energía.

🔹 Ejemplo. En un cultivo de caña de azúcar con distancia entre surcos de 1.65 m y 6.06 km de surcos por hectárea se obtiene una productividad de 130 t/ha, es decir, 21.5 t/km de caña, de modo que un vagón se llenaría en ~500 metros. Si los tablones tienen 120 m de longitud en el sentido del surco se llenaría el vagón con la cosecha de cuatro tablones y si tienen 100 m, con cinco tablones. Así es factible eliminar callejones y aprovechar mejor el área de cultivo.

Para facilitar las operaciones de campo y mejorar los rendimientos del riego y la cosecha es necesario construir tablones de forma rectangular; sin embargo, en ocasiones esto no es posible debido a la existencia de linderos y obstáculos naturales o por errores en el diseño de campo. En estas condiciones se presentan los ‘serruchos’ que exigen extender las tuberías, y aumentan los recorridos de la maquinaria y los equipos, así como los costos asociados con las labores de cultivo.

Preparación del suelo

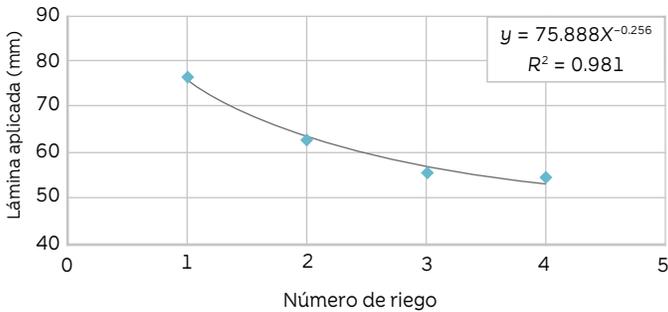
La eficiencia de aplicación en el riego por goteo depende, en gran medida, de la adecuada preparación del suelo, lo que incluye las labores de nivelación y destrucción de agregados para facilitar el movimiento capilar del agua y corregir las deformaciones del bulbo húmedo.

En suelos de textura fina la presencia de agregados grandes después de las labores de preparación favorece la percolación de agua hacia los estratos inferiores, lo que dificulta su absorción por las plantas. En suelos bien preparados las proporciones de agregados pequeños, medianos y grandes deben ser iguales (Figura 3.5).



► **FIGURA 3.5.** Implemento ‘escardillo’ (derecha) y agregados del suelo antes de pasar escardillo (izquierda, arriba) y después de hacerlo (abajo).

La labranza vertical es la labor de preparación que más afecta las propiedades hidráulicas del suelo. La Figura 3.6 muestra las láminas aplicadas e infiltradas en surcos de riego en un cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca.



Suelo Palmira, Pachic Haplustoll, familia textural francosa fina.

► **FIGURA 3.6.** Láminas de agua aplicadas e infiltradas en surcos. Caña de azúcar, valle del río Cauca, Colombia.

Eficiencia del sistema de riego, e

La eficiencia de un sistema se define como la relación entre una salida útil y una entrada (Figura 3.7). Todo sistema de riego consta de las fases de conducción, aplicación y uso del agua por el cultivo; a cada fase es posible asignarle una eficiencia, de manera que se puede hablar de una eficiencia de conducción (e_c), una eficiencia de aplicación (e_a) y una eficiencia de uso (e_u).

$$e = \frac{\text{Salida útil}}{\text{Entrada}}$$

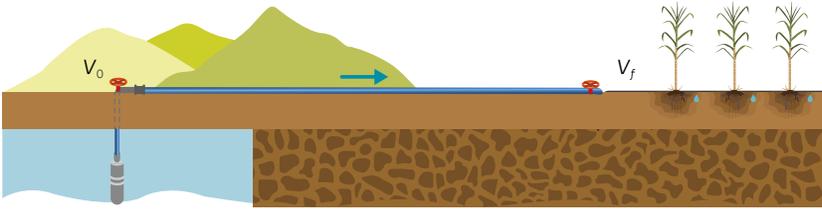


► **FIGURA 3.7.** Relaciones de eficiencia (e) en un sistema.

Eficiencia de conducción, e_c

En el caso del riego, es la relación entre el volumen de agua o caudal entregado al campo (V_f), y el caudal derivado en la toma o fuente (V_0) (Ecuación 3.6 y Figura 3.8). En riego por goteo, la conducción del agua se realiza por tuberías plásticas que garantizan total estanqueidad, por lo cual es de esperar una $e_c = 1$.

$$e_c = \frac{V_f}{V_0} \quad (3.6)$$

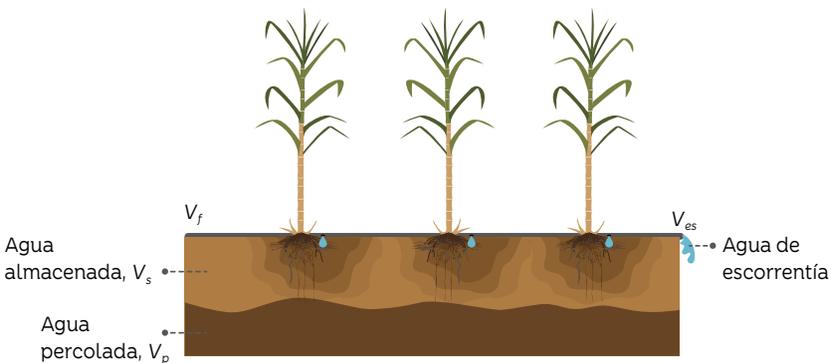


► FIGURA 3.8. Eficiencia de conducción (e_c) en un sistema de riego.

Eficiencia de aplicación, e_a

Es la relación entre el agua almacenada en la zona de raíces del cultivo (V_s), y el agua aplicada al lote (V_f), (Ecuación 3.7 y Figura 3.9). Cuando se aplica riego es necesario tener en cuenta pérdidas de agua por escorrentía (V_{es}) y por percolación (V_p); las magnitudes son variables según el sistema de riego que se utilice. Es probable que en riego por gravedad estas pérdidas sean significativas, mientras que en riego por goteo son mínimas; por tanto, la eficiencia de aplicación en este último sistema es alta. Se considera que en pendientes $<5\%$, las pérdidas por escorrentía son nulas en riego por goteo; también las pérdidas por percolación son mínimas en sistemas con altas frecuencias de riego en pequeñas láminas de agua.

$$e_a = \frac{V_s}{V_f} \quad (3.7)$$

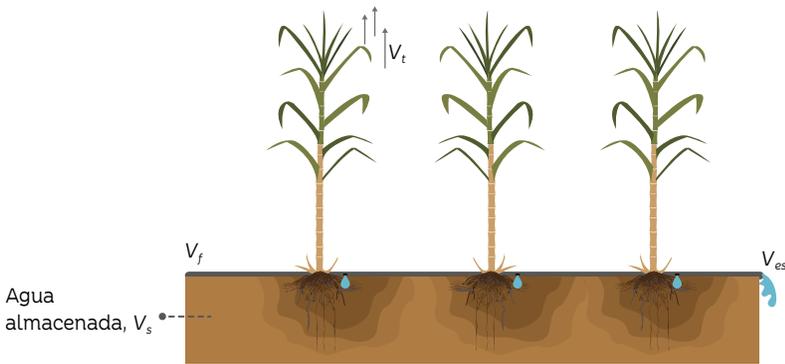


► FIGURA 3.9. Eficiencia de aplicación (e_a) en un sistema de riego.

Eficiencia de uso, e_u

Es la relación entre el agua transpirada por el cultivo (V_t) y el agua almacenada en la zona de raíces (V_s), (Ecuación 3.8 y Figura 3.10). En las etapas tempranas del cultivo las pérdidas de agua ocurren principalmente por evaporación directa desde la superficie del suelo; no obstante, en la medida que el cultivo se desarrolla y el área de sombra incrementa, estas pérdidas disminuyen hasta llegar a una etapa en que casi toda el agua almacenada (V_s) es transpirada (V_t), lo que eleva la eficiencia de uso (e_u) hasta un valor cercano al 100%.

$$e_u = \frac{V_t}{V_s} \quad (3.8)$$



► FIGURA 3.10. Eficiencia de uso (e_u) en un sistema de riego por goteo.

Eficiencia de riego, e_r

De igual manera que se asigna una eficiencia a cada una de las fases del riego, también es posible asignar una eficiencia global al sistema total (Ecuación 3.9).

$$e_r = \frac{V_t}{V_0} \quad (3.9)$$

cuando esta relación es multiplicada y dividida por V_s y V_f , resulta:

$$e_r = \frac{V_t}{V_0} * \frac{V_s}{V_s} * \frac{V_f}{V_f} = \frac{V_t}{V_s} * \frac{V_s}{V_f} * \frac{V_f}{V_0}$$

sustituyendo:

$$e_r = e_u * e_a * e_c \quad (3.10)$$

Las relaciones anteriores indican que la eficiencia global de riego es el producto de las eficiencias de cada una de sus fases. Si la $e_c = 1$ y las pérdidas por escorrentía y percolación profunda son mínimas; se espera que en cultivos de alta densidad la eficiencia de uso sea alta. Actualmente, la eficiencia de riego más alta en caña de azúcar se obtiene con el sistema de riego por goteo en comparación con los demás sistemas utilizados.

Eficiencia de almacenamiento, e_s

En cada evento de riego la humedad en el suelo debe alcanzar la capacidad de campo, con el fin de reponer el déficit de agua. La eficiencia de almacenamiento se define como la relación entre la lámina de agua almacenada (Ecuación 3.1) en el perfil del suelo (V_s) y el déficit de humedad ($V_{fc} - V_a$), siendo V_{fc} el contenido de humedad a capacidad de campo y V_a el contenido de humedad del suelo previo al evento de riego (Hofman, 2007).

$$e_s = \frac{V_s}{V_{fc} - V_a} \quad (3.11)$$

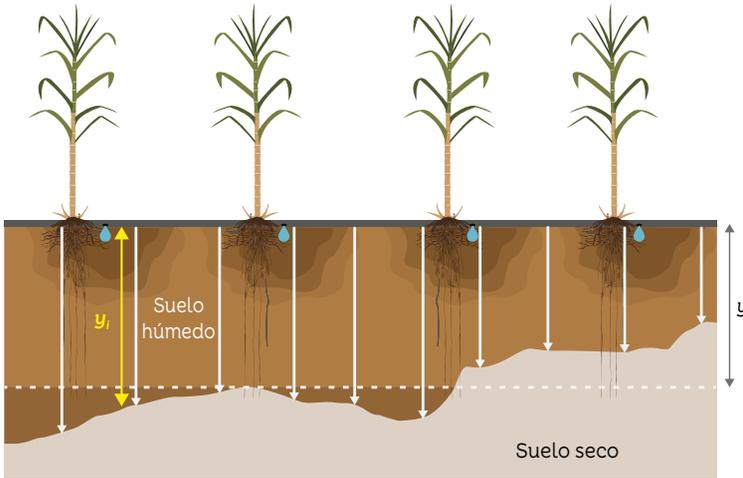
Eficiencia de distribución en campo, e_d

En el sistema de riego por goteo es de especial importancia tener en cuenta una medida de la uniformidad de los caudales y las láminas o los volúmenes de agua aplicados; su descripción se basa en coeficientes estadísticos (Figura 3.11).

$$e_d = 1 - \frac{d}{y} \quad (3.12)$$

$$d = \frac{(y_i - y)}{n}$$

$$y = \sum \frac{y_i}{n}$$



OBSERVACIÓN: y_i es un valor de la variable medida, y es el promedio de los valores medidos y d es la desviación media de los valores medidos en relación con el promedio.

► **FIGURA 3.11.** Eficiencia de distribución (e_d) de agua en un sistema de riego.



Diseño agronómico

En la planificación del riego por goteo es necesario considerar que el sistema localiza el agua en una fracción de la zona potencial de raíces del cultivo y permite la operación con alta frecuencia. Esta alta frecuencia, con sus consecuentes bajas láminas por evento de riego, hace que las condiciones atmosféricas prevalezcan sobre las condiciones edáficas en los parámetros de diseño. En general, en la planificación del sistema se sigue la misma secuencia de cálculos que en el riego por gravedad, con diferencias en aspectos marginales, tales como los parámetros hidrofísicos que se tratan a continuación.

Lámina útil, d_u

La lámina útil o aprovechable de un suelo depende de su capacidad de retención de humedad, de la densidad aparente y de la profundidad considerada en el perfil (ver Ecuación 1.14).

En el valle del río Cauca se presenta una alta variabilidad de suelos, algunos de ellos con altos contenidos de agregados gruesos que alcanzan tamaños de gravas (C_g). La presencia de esta clase de materia-

les reduce la capacidad de retención de humedad y hace necesaria una corrección que consiste en multiplicar la Ecuación 1.14 por el factor $(1 - C_g)$; así, la lámina útil se expresa como:

$$d_u = (\Theta_{wcc} - \Theta_{wPMP}) * (1 - C_g) * S_b * d_t \quad (3.13)$$

Lámina neta máxima, d_x

La lámina neta máxima que debe ser aplicada al suelo para uso por el cultivo, se expresa como:

$$d_x = d_u * P_w * C_a \quad (3.14)$$

donde,

P_w es el porcentaje del suelo humedecido. De manera simplificada, es la relación entre el área humedecida por un emisor o por un conjunto de emisores y el área potencial de raíces del cultivo. En sentido estricto, es la relación entre el volumen de suelo humedecido por el riego y el volumen de suelo explorado por las raíces del cultivo.

C_a es el coeficiente de agotamiento del cultivo, umbral de riego, factor de agotamiento o fracción de agotamiento. Es igual a la fracción de la humedad aprovechable posible de agotar antes de aplicar el siguiente riego. El valor de C_a sugerido por la FAO (Allen *et al.*, 2006) para caña de azúcar es de 0.65 (para $ET = 5$ mm/día); sin embargo un valor de 0.50 es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos. Por la alta frecuencia del riego por goteo, difícilmente estos valores son aplicables y, en cambio, es preferible establecer las láminas de riego con base en la transpiración del cultivo.

Debido a la dificultad para conocer la extensión del sistema radical, se asume que las raíces se extienden hasta donde llega el área de sombra del cultivo. Se recomienda mantener y diseñar el sistema con valores de P_w comprendidos entre 33% y 67%; en regiones húmedas se aceptan valores menores del 33% en suelos de textura media y fina (Keller y Bliesner, 1990). En todos los casos, la mejor decisión en este sentido es medir la extensión del bulbo húmedo tomando muestras en varios sitios mediante cateos hasta 30 cm de profundidad, con el fin de establecer un valor más real.

En un cultivo de caña de azúcar con una línea de goteo por surco se determina la extensión del bulbo y el resultado se divide entre la distancia entre surcos. En suelos de textura gruesa el bulbo es muy estrecho, mientras que en suelos finos los bulbos húmedos de dos surcos sucesivos en ocasiones se traslapan; lo cual indica que se puede llegar al 100% del suelo humedecido en la zona de raíces.

Por ejemplo, en un cultivo de caña de azúcar en surcos a 1.65 m y ancho de franja humedecida de 0.6 m, P sería de 0.36 o 36%. En cultivos como frutales el concepto se maneja por planta, como $P_w = n * A_h / A_s$, donde P_w es el porcentaje de área humedecida, n es el número de emisores por planta, A_h es el área humedecida por un emisor y A_s es el área sombreada por una planta.

Como resultado del avance de las investigaciones, actualmente es posible reemplazar este coeficiente por un valor de humedad que corresponde al potencial hídrico óptimo del cultivo ($\Theta_{wHópt}$) el cual debe ser determinado experimentalmente (Pizarro, 1987), en cada caso:

$$d_x = (\Theta_{wCC} - \Theta_{wHópt}) * S_b * d_t * P_w \quad (3.15)$$

La humedad correspondiente a la tensión óptima puede ser establecida mediante la curva de retención de humedad del suelo.

Lámina neta, d_n

Para evitar pérdidas de agua por percolación es necesario que la lámina neta sea menor o igual a la lámina neta máxima, es decir $d_n \leq d_x$.

Lámina bruta, d_g

La lámina bruta es la relación entre la lámina neta y la eficiencia de aplicación (e_a), (Ecuación 3.16).

$$d_g = \frac{d_n}{e_a} \quad (3.16)$$

La e_a es la relación entre el agua que llega a la cabecera del lote por regar y el agua almacenada en el perfil del suelo; en riego por goteo, la e_a involucra el aprovechamiento del agua por el cultivo en la relación de transpiración (RT) y la uniformidad del riego en la uniformidad de emisión (UE).

$$e_a = RT * UE \quad (3.17)$$

La RT es la relación entre el agua transpirada (V_t) y el agua aplicada (d_g). En la fase de diseño del sistema de riego por goteo es común tomar un valor de $RT = 0.90$, lo cual significa que el 90% del agua aplicada es transpirada por el cultivo; en cultivos con coberturas plásticas (acolchados), como la fresa, este valor puede ser próximo a 1.0.

La uniformidad de emisión (UE) es una medida de los caudales aplicados por los emisores y depende de factores hidráulicos. Este con-

cepto puede ser referido a los caudales emitidos por un lateral (UE_l) o a todos los emisores que componen un sector de riego (UE_s); para diseño, se puede asumir un valor de $UE_s = 0.92$. Existen dos tipos de uniformidad de emisión: la UE_d de diseño y la UE_e de campo; esta última se usa para evaluar la uniformidad del sistema una vez instalado. Siguiendo las recomendaciones de ASAE EP405.1 (1988, 2014) la UE_l se calcula como:

$$UE_l = \left(1 - \frac{1.27}{\sqrt{n}} * C_v\right) * \frac{q_n}{q_a} \quad (3.18)$$

donde,

n es el número de goteros por planta. En el cultivo de caña de azúcar la siembra se realiza utilizando trozos de tallos con yemas que dan origen a las plantas. Cuando este cultivo se riega con cintas provistas de goteros a corta distancia, se conforma una franja húmeda a lo largo del surco, y se puede considerar adecuado un valor de $n = 1$.

C_v es el coeficiente de variación del gotero o relación entre la desviación estándar y la media de los caudales de una muestra de ellos. Un valor C_v de 0.05 o menor indica una buena calidad del gotero.

q_n / q_a corresponde a la relación entre el caudal mínimo de los goteros (q_n) y el caudal medio (q_a) y depende del exponente x del gotero y de la diferencia de presión relativa entre los extremos del lateral ($[h_{inicial} - h_{final}] / h_a$) siendo h_a la presión media de los goteros del lateral.

$$\frac{q_n}{q_a} = 1 - 0.38 * x * \frac{h_{inicial} - h_{final}}{h_a} \quad (3.19)$$

🔹 Ejemplo. En un lateral de goteo de diámetro constante, cuyos goteros tienen un $x = 0.5$, $C_v = 0.05 = 5\%$, $h_a = 10$ m y una diferencia de presión entre los extremos de 0.9 m, la relación q_n / q_a es 0.983 o 98.3% y la uniformidad de emisión del lateral de riego, $UE_l = 0.946 = 94.6\%$.

La UE_s depende de la UE_l y de la relación (Q_n / Q_a), donde Q_n es el caudal mínimo de los laterales del sector y Q_a es el caudal medio de los laterales del sector.

$$UE_s = UE_l * \frac{Q_n}{Q_a} \quad (3.20)$$

De igual forma que en el lateral, existe una expresión para $\frac{Q_n}{Q_a}$:

$$\frac{Q_n}{Q_a} = 1 - 0.22 * x * \frac{h_a - h_{final}}{h_{inicial}}$$

donde, x corresponde al exponente de la ecuación del lateral. Cuando el lateral se asimila a un gran gotero (Ecuación 3.21), por tratarse de una condición de flujo turbulento se puede asumir un valor de $x = 0.5$, en ese caso:

$$Ql = K_l * h^x \quad (3.21)$$

donde, Ql es el caudal del lateral, K_l es la constante del lateral y h es la presión en el múltiple a la entrada del lateral.

Frecuencia de riego, FR

La frecuencia de riego es el número de días transcurridos entre dos eventos de riego consecutivos. En la planeación del sistema se calcula como la relación entre la lámina neta (d_n) y la transpiración del cultivo (V_t) en la época de máxima demanda de agua.

$$FR = \frac{d_n}{V_t} \quad (3.22)$$

De acuerdo con Keller y Karmelli (1975) el valor de la transpiración se toma como el producto de la evapotranspiración (ET) por el porcentaje de sombra del cultivo (P_s), sobre un valor de referencia del 85%. Si el porcentaje de sombra es $>85\%$, se asume que la transpiración es igual a la evapotranspiración.

En la planificación del sistema de riego, el diseño se realiza para la época de máxima demanda del cultivo.

$$V_t = ET * \frac{P_s}{85} \quad (3.23)$$

donde, ET es la evapotranspiración real máxima diaria del cultivo, P_s es el porcentaje de sombra o relación entre el área sombreada por el cultivo y el área total, $P_s = \frac{A_s}{A_t}$.

El valor calculado de FR debe ser ajustado al número de días efectivos disponibles para ejecutar la labor en todo el cultivo; por ejemplo, si la frecuencia de riego es semanal (7 días) y no se aplica riego el domingo, solo se dispondrá de 6 días para regar, por tanto, este valor es el que se debe usar en el cálculo del número de sectores de riego.

Tiempo de riego, TR

En cultivos en hileras, como la caña de azúcar, el tiempo de riego (TR) se determina como la relación entre la lámina bruta (d_g) y la tasa de aplicación (TA) que, a su vez, es dada por la relación entre el caudal unitario —litros por hora por metro de longitud— de la cinta de riego utilizada y la separación entre surcos.

💧 **Ejemplo.** En un cultivo de caña de azúcar en surcos separados 1.65 m se desea calcular la TA en un sistema de riego en el cual se ha instalado cinta con goteros de 1 L/h cada 40 cm. En este caso, el caudal unitario es 1 L/h por 0.40 m = 2.5 L/h.m y la tasa de aplicación es 2.5 L/h.m dividido por 1.65 m = 1.52 L/h.m² = 1.52 mm/h, debido a que 1 mm = 1 L/m².

Jornada de riego, JR

Es la cantidad de horas diarias durante las cuales se aplica riego y puede variar desde 6 hasta 24, dependiendo de factores laborales, tecnológicos, culturales y ambientales. Por ejemplo, el fenómeno de El Niño en 2016 provocó que la autoridad ambiental del Valle del Cauca restringiera a 12 horas diarias el tiempo de bombeo de pozos y la captación de aguas superficiales.

Número de sectores, N

Es el número de unidades en las cuales es necesario dividir el campo para cumplir la meta de regar oportunamente el cultivo; se expresa por la relación:

$$N \leq FR * \frac{JR}{TR} \quad (3.24)$$

💧 **Ejemplo.** Se quiere conocer el número de sectores en un campo que se debe regar diariamente con una restricción de jornada de 12 h y tiempos de riego de 1.5 h. Aplicando la Ecuación 3.24, se tiene: $N = 1 * 12 / 1.5 = 8$; si la jornada cambia a 24 h, entonces: $N = 1 * 24 / 1.5 = 16$; y si la frecuencia cambia a 3 días, con jornadas de 12 h, el tiempo de riego se triplica y $N = 3 * 12 / 4.5 = 8$ sectores.

Área del sector, As

El área del sector o módulo de riego resulta de dividir el área total de riego entre el número de sectores.

$$As = At / N \quad (3.25)$$

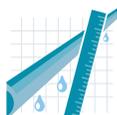
Volumen de agua por sector, V_r

El volumen de agua que se debe aplicar en un evento de riego es el producto del área del sector y la lámina bruta. Si el área del sector se expresa en hectáreas y la lámina bruta de agua en mm, el resultado multiplicado por 10 será igual a los metros cúbicos (m^3) de agua aplicados: $V_r = A_s * d_g$.

Caudal del sector, Q_s

El objetivo final de la planificación del riego es obtener el caudal del sistema requerido para satisfacer la demanda en la época de máximo consumo del cultivo (Ecuación 3.26), con lo cual se garantiza la suficiencia del sistema para cualquier otra etapa del cultivo. Este caudal en L/s resulta de dividir el volumen del sector (V_r) en m^3 entre el tiempo de riego (TR) en horas y multiplicarlo por un factor de conversión de 3.6.

$$Q_s = \frac{V_r}{TR} \quad (3.26)$$



Alternativas de planificación del riego

Un procedimiento alternativo en la planeación del riego por goteo consiste en fijar la FR entre 1 y 3 días, calcular $d_n = FR * V_r$; $d_g = d_n / e_a$; fijar JR ; estimar TR ; y hallar N y Q_s .

Cuando se conoce el caudal disponible para un proyecto, como ocurre en un pozo profundo con bombeo probado en época seca, se recomienda diseñar el sistema con este caudal y, así, aprovecharlo totalmente. Una vez elegido el tipo de cinta y su caudal unitario, o caudal por metro lineal, se calcula el área que se puede cubrir en un sector de riego de tal forma que se cumpla con la frecuencia de riego fijada. Se debe tener presente que cuando el diseño se hace para una frecuencia diaria, el sistema será suficiente para cualquier otra frecuencia.

💧 **Ejemplo.** En un cultivo de caña de azúcar en surcos distanciados 1.65 m, se dispone de un pozo profundo con caudal seguro de 50 L/s. En este caso, se quiere conocer el tamaño de los sectores si se utiliza una cinta de riego con caudal unitario de 5 L/h.m. Partiendo de la distancia entre surcos, en 1 ha se tienen 6067 m de cultivo que requieren un caudal de $6067 * 5 = 30,335$ L/h = 8.43 L/s. Como el caudal disponible es de 50 L/s, el área del sector es: $(50 \text{ L/s}) / (8.43 \text{ L/s.ha}) = 5.93$ hectáreas.



Programación de los riegos

Aproximadamente en el 65% del área cultivada con caña de azúcar en el valle del río Cauca la programación de los riegos se hace utilizando el balance hídrico (Cenicaña, 2018), junto con el tanque evaporímetro tipo A para determinar la evapotranspiración del cultivo. No obstante, cada día se desarrollan nuevos y mejores métodos para la programación de los riegos, entre ellos los sensores de humedad del suelo que permiten mayores ahorros de agua y mejor productividad del cultivo.

Balance hídrico

Los balances hídricos están diseñados principalmente para caracterizaciones climáticas de tipo regional y no para la determinación de la *ET*. Por lo general, un balance se hace sobre los flujos verticales de agua, excepto en terrenos donde la pendiente es pronunciada y los flujos laterales desde las zonas altas hacia las bajas pueden ser significativos.

En la medida que el balance es alimentado con datos cercanos a la realidad, los resultados son más confiables. En zonas inundables con niveles freáticos superficiales, el balance hídrico debe contener la variable del aporte capilar a la evapotranspiración desde el nivel freático; en estos casos la forma general del balance es:

$$Pr + R + Ac = ET + Per + Es \pm \Delta S \quad (3.27)$$

donde, *Pr* es precipitación, *R* es riego, *Ac* es aporte capilar, *ET* es evapotranspiración, *Per* es percolación, *Es* es escorrentía superficial y ΔS son cambios en el contenido de humedad en el suelo.

Para la programación de los riegos por goteo utilizando el balance hídrico es necesario calcular una lámina de riego que no produzca pérdidas por escorrentía o percolación; el riego por goteo aplica láminas de riego controladas que no producen excesos de agua. Además, se debe garantizar que los cambios en la humedad del suelo no sean significativos entre riegos. Por tanto, la necesidad neta de agua (*NR*) estará en función de la evapotranspiración (*ET*), el aporte capilar (*Ac*) y la precipitación efectiva (*Pe*):

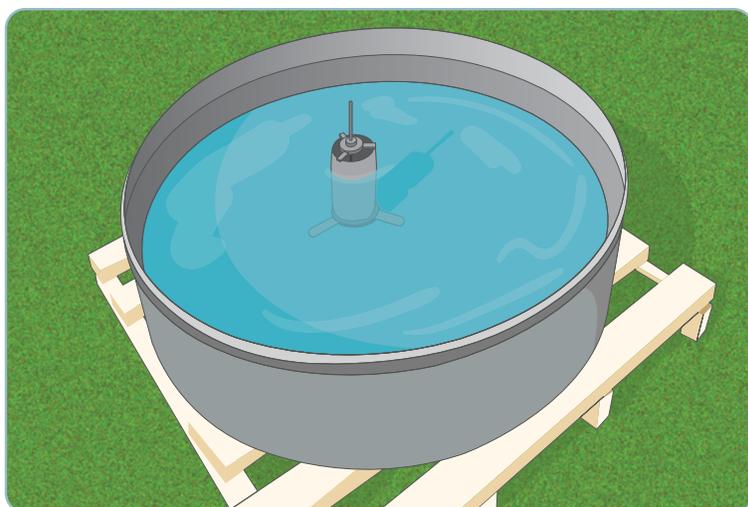
$$NR = ET - Ac - Pe \quad (3.28)$$

La cantidad de agua de riego aplicada a un cultivo debe ser la necesaria para restituir el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo a la profundidad de las raíces. Respecto a las pérdidas por percolación profunda, para calcular dicha cantidad de agua es necesario determinar la curva de retención de humedad y la densidad aparente del suelo, características que permiten expresar la humedad en términos de láminas. Cuando es necesario lavar el suelo se recomienda que el exceso de agua sea entre el 10% y el 20% de la lámina de riego (ver: *Fracción de lavado*, p.74).

Evapotranspiración, *ET*

La evapotranspiración del cultivo de la caña de azúcar puede ser estimada de manera indirecta mediante el conocimiento de la evaporación medida en tanques evaporímetros y atmómetros.

Tanque evaporímetro. El tanque evaporímetro es el método más satisfactorio para medir la evapotranspiración en campo, siendo el tanque tipo A el más utilizado (Figura 3.12), tal como lo recomiendan la FAO y la OMM; la pérdida de agua de la planta y del tanque obedecen básicamente a los mismos factores físicos. El tanque presenta ventajas en precisión y sencillez, frente a métodos como las determinaciones de humedad en el suelo y las fórmulas empíricas y racionales que requieren para su aplicación información sobre el clima, que en la mayoría de los casos no se encuentra disponible o es incompleta. Butsaer, citado por Chang (1971), encontró que la *ET* medida en



► FIGURA 3.12. Tanque evaporímetro clase A.

lisímetro presentó diferentes valores de correlación (en paréntesis) con las mediciones dadas por: tanque evaporímetro (0.977), ecuaciones de Penman (0.79) y Thornthwaite (0.72), Blanney–Cridle (0.59). Los datos muestran el buen ajuste del tanque frente al lisímetro.

Cenicaña ha adoptado el tanque tipo A como instrumento de medida de la evaporación (E) a partir de la cual es posible estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c), por un procedimiento que consiste en calcular la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_o), como el producto de un coeficiente de tanque (K_p) y la evaporación leída; este cultivo de referencia es normalmente un pasto que cumple los requisitos impuestos en la definición de Penman de evapotranspiración potencial (ET_o).

$$ET_o = K_p * E \quad (3.29)$$

Conocida la ET_o , al multiplicarla por un coeficiente de cultivo (K_c) que es función de la edad del mismo, se obtiene la ET_c .

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (3.30)$$

Al realizar el producto de K_p y K_c se obtiene un K (conocido como coeficiente de evaporación y, regionalmente, como coeficiente de programación de los riegos).

Al reemplazar ET_o en ET_c , queda $ET_c = K_c * K_p * E$,

$$ET_c = K * E \quad (3.31)$$

El coeficiente único de cultivo (K_c) integra los efectos combinados de las características del cultivo, su transpiración y la evaporación del suelo. Los coeficientes promedio del cultivo son apropiados para la planificación normal del riego, los propósitos de manejo, la definición de calendarios básicos de riego y la mayoría de los estudios de balance hídrico (FAO, 2006).

En la *Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (FAO, 2006), para un cultivo de caña de azúcar con una altura máxima de 3 m, bien manejado y que crece en un clima húmedo, se proponen los valores de K_c inicial = 0.4, K_c medio = 1.25 y K_c final = 0.75. También, los coeficientes de tanque K_p para diferentes condiciones de velocidad del viento y humedad relativa, como se muestra en el Cuadro 3.4.

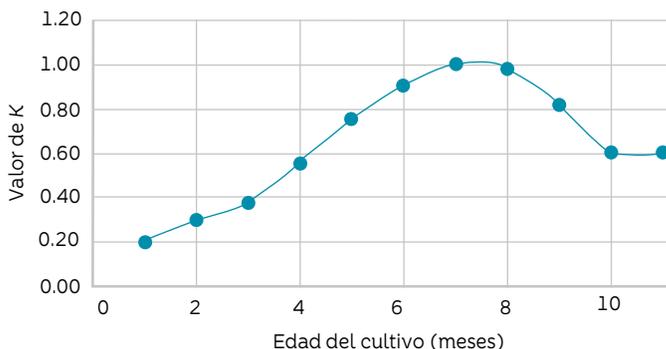
► **CUADRO 3.4.** Coeficientes del tanque evaporímetro (K_p) para un tanque Clase A situado en una superficie cultivada y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa (HR).

Velocidad del viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento ¹ (m)	K_p de tanque clase A según humedad relativa media del aire		
		HR baja <40%	HR media 40–70%	HR alta >70%
Baja <2	1	0.55	0.65	0.75
	10	0.65	0.75	0.85
	100	0.70	0.80	0.85
	1000	0.75	0.85	0.85
Moderada 2–5	1	0.50	0.60	0.65
	10	0.60	0.70	0.75
	100	0.65	0.75	0.80
	1000	0.70	0.80	0.80
Alta 5–8	1	0.45	0.50	0.60
	10	0.55	0.60	0.65
	100	0.60	0.65	0.70
	1000	0.65	0.70	0.75
Muy alta >8	1	0.40	0.45	0.50
	10	0.45	0.55	0.60
	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.55	0.60	0.65

1. Barlovento es la dirección desde la cual llega el viento.

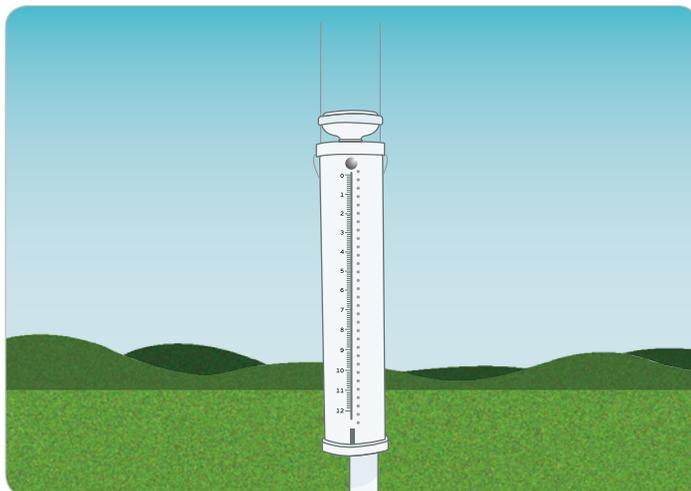
Fuente: adaptado de Allen (2006).

Cenicaña ha venido ajustando los valores del coeficiente que se sugiere utilizar para la programación de los riegos por goteo en caña de azúcar en el valle del río Cauca (Figura 3.13).



► **FIGURA 3.13.** Curva de K para la programación de los riegos.

Atmómetro. Este instrumento (Figura 3.14) permite medir la evaporación que ocurre en una porcelana porosa alimentada de agua por capilaridad desde un recipiente cilíndrico. La porcelana se encuentra recubierta con un paño de color verde que simula el color del follaje de las plantas y la cantidad de agua evaporada se mide en una columna externa transparente. De esta manera simula la pérdida de agua del cultivo por evapotranspiración.



► FIGURA 3.14. Atmómetro.

Aporte capilar, A_c

En cultivos de caña de azúcar sometidos a la influencia del nivel freático, Cenicaña (1991) determinó la magnitud del aporte capilar en lisímetros de percolación y como porcentaje de la evapotranspiración de la caña de azúcar (Cuadro 3.5).

► **CUADRO 3.5.** Aporte porcentual promedio de agua por capilaridad al uso consuntivo de la caña de azúcar, en diferentes profundidades del nivel freático.

Profundidad del nivel freático (cm)	Aportes por capilaridad (%)
50	65
100	31
150	8

Fuente: tomado de Cenicaña (1991).

Si bien el aporte capilar puede tener un efecto benéfico para el cultivo, los niveles freáticos superficiales, a profundidades menores de 60 cm, tienen un fuerte efecto depresivo sobre la productividad de la caña de azúcar, el cual se ve reforzado por el tiempo de permanencia de tal condición.

Precipitación efectiva, P_e

Dependiendo de la intensidad y el volumen, la precipitación puede ser útil o perjudicial para el cultivo. Desde el punto de vista de la producción agrícola, la precipitación efectiva es aquella porción del total anual de agua caída que es útil directa o indirectamente para la producción de cultivos, sin necesidad de bombeo para su aprovechamiento. En ella se incluyen el agua interceptada por la vegetación viva o seca, las pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo, las pérdidas por evapotranspiración durante el crecimiento del cultivo, la fracción que contribuye a la filtración, el agua de percolación y, en general, el agua que facilita las labores de cultivo antes o después de la siembra. En contraste, la lluvia inefectiva es aquella parte de agua de la precipitación que se pierde por escurrimiento superficial, percolación profunda innecesaria, humedad permanente en el suelo después de la cosecha, por lo que no es aprovechable en el siguiente ciclo de cultivo (FAO, 2000).

Cenicaña determinó la precipitación efectiva de la caña de azúcar para programar riegos mediante balance hídrico. De acuerdo con esta investigación, en el valle del río Cauca la precipitación efectiva en el cultivo de caña es aproximadamente el 80% de las precipitaciones entre 1 mm y 12 mm y el 90% de las precipitaciones superiores a 12 mm (Alarcón y Cruz, 2012).

Actualmente se encuentra disponible en www.cenicana.org el programa automatizado Balance Hídrico v. 4.0 que incluye una nueva función para estimar el coeficiente K para la programación de riegos, utiliza la precipitación efectiva, captura automáticamente datos de evaporación y genera informes gráficos y en mapas.

Manejo del riego con tensiómetros

La aplicación de riego a la caña de azúcar puede guiarse mediante la instalación en campo de tensiómetros (Figura 3.15) cuya cantidad depende de la variedad de suelos en el área de riego. La caña de azúcar se caracteriza por tener raíces de profundidad media, lo que exige contar con dos tensiómetros por sitio de medición uno superficial (entre 20 y

30 cm de profundidad) en la zona donde se concentra el mayor volumen de raíces y otro profundo (entre 40 y 45 cm) (Hincapié G., 2018). Para el control del riego por goteo los tensiómetros deben ser instalados entre dos goteros.



► FIGURA 3.15. Detalle de tensiómetro utilizado en suelos cultivados con caña de azúcar.

En cultivos jóvenes, el tensiómetro superficial mostrará un incremento importante en la tensión en la medida en que el suelo se seca, mientras que el tensiómetro profundo no muestra incrementos en la tensión, ya que las raíces no han penetrado lo suficiente para absorber agua a esa profundidad. En estos casos el tensiómetro superficial indica el momento de riego.

A medida que el cultivo se desarrolla y las raíces crecen en profundidad, el tensiómetro profundo muestra el consumo de agua. Cuando esto sucede se toma una lectura promedio de ambos tensiómetros y se compara con el nivel determinado para el inicio de riego (De la Fuente, 2006). En términos generales, las lecturas entre 0 y 4 cbar indican suelos saturados, entre 10 y 20 cbar suelos a capacidad de campo, y entre 30 y 80 cbar el rango usual para iniciar el riego, excepto en riego por goteo donde el suelo generalmente es mantenido a capacidad de campo (Cuadro 3.6).



Medidor de humedad.

► **CUADRO 3.6.** Interpretación del estado de humedad del suelo a partir de lecturas tomadas con tensiómetro.

Tensión (cbar)	Estado de humedad en el suelo	Explicación/acción
0	Saturado	Estado de saturación para cualquier tipo de suelo. Si la lectura persiste, indica problemas de drenaje fuerte y aireación pobre, o posible rompimiento de la columna de agua en el tubo, con pérdida de la lectura.
5 – 10	Exceso	Exceso de humedad para el desarrollo de las plantas, es indicador de que el drenaje continúa. Si la lectura persiste, indica que el drenaje es pobre.
10 – 20	Capacidad de campo	Indica capacidad de campo para la mayoría de los suelos, la aplicación extra de agua se perderá por percolación con el consiguiente lavado de nutrientes. En suelos arenosos con baja capacidad de retención de agua se inicia el riego entre 15–20 cbar.
20 – 30	Rango de inicio del riego	Buen nivel de agua disponible y aireación en los suelos de texturas fina y media, no se requiere riego. En suelos arenosos indica el rango de inicio del riego.
30 – 40		Indica el riego para suelos de arena fina y para la mayoría de los suelos bajo régimen de riego por goteo.
40 – 60		Indica el inicio del riego para la mayoría de los suelos. En suelos francos se inicia entre 40–50 cbar. La decisión depende del estado de desarrollo del cultivo.
70	Seco	Se inicia el rango de estrés, pero es probable que el cultivo aún no sufra daño. Los suelos arcillosos todavía contienen agua disponible, pero no en niveles suficientes para un desarrollo máximo del cultivo.
80	–	Indica el rango máximo para la efectividad del tensiómetro. Las lecturas mayores son posibles, pero la columna de agua se puede romper en el equipo entre 80–85 cbar, dependiendo de la altura del instrumento con respecto al nivel del mar. A mayor altitud, menor la lectura en la cual se rompe la columna de agua.

Fuente: adaptado de De La Fuente (2006).

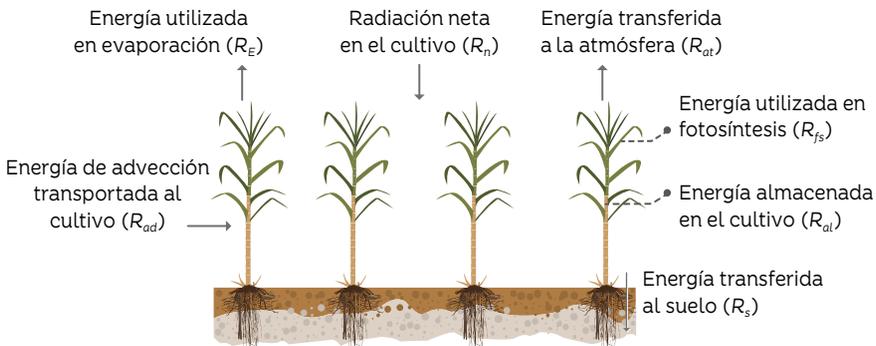
El conocimiento de la evaporación en tanque, las lecturas de tensiómetros, la curva de retención de humedad y las densidades aparente y real permiten proponer un plan de riego ajustado a las necesidades de cultivo, en el cual se tengan en cuenta las condiciones del suelo, el clima, el cultivo y la aplicación oportuna de las láminas de riego requeridas de acuerdo con el uso consuntivo y la capacidad de almacenamiento, en frecuencias determinadas con el fin de mantener o mejorar una producción de manera sostenida.

Método de balance de energía

Así como en el balance hídrico es posible establecer la ecuación de pérdidas y ganancias de humedad en el perfil del suelo, en un cultivo también es posible establecer la ecuación de pérdidas y ganancias de energía. El método se basa en la conversión de la cantidad de radiación utilizada en E o ET a lámina evaporada, después de determinarla mediante un balance de energía sobre el cultivo (Figura 3.16).

$$R_n + R_{ad} = R_s + R_{at} + R_E + R_{al} + R_{fs} \quad (3.32)$$

donde, R_n = radiación neta en el cultivo, R_{ad} = energía de advección transportada al cultivo, R_s = energía transferida al suelo, R_{at} = energía transferida a la atmósfera, R_E = energía utilizada en evaporación, R_{al} = energía almacenada en el cultivo, y R_{fs} = energía utilizada en fotosíntesis.



► FIGURA 3.16. Esquema del balance de energía en un cultivo.

Después de simplificar el balance, mediante la eliminación de los términos menores se llega a $R_E = R_n / (B + 1)$ donde B es la relación de Bowen = 0.2 para cultivos bien regados. De esta forma, $E = R_E / 59$ (mm/día), cuando R_E (cal/cm²-día) y 59 corresponde al calor latente de vaporización del agua ($CLV = 590$ cal/cm³).

Dado que la energía utilizada en evaporación depende de la radiación neta, es necesario estimar este valor. Para ello se utiliza el esquema de la Figura 3.17, tomando en cuenta que la radiación neta es el resultado de los flujos de calor o radiaciones entrantes y salientes del Sol y la Tierra. Por estar el Sol a una temperatura aproximada de 6000 °K emite radiación de alta energía (frecuencia) que se conoce como radiación de onda corta, mientras que la superficie terrestre se encuentra a unos 300 °K y emite, principalmente, radiación de onda larga.

La radiación que llega del Sol al tope de la atmósfera alcanza una intensidad aproximada de 2 cal/cm².min, valor conocido como constante solar. Antes de alcanzar la superficie terrestre, dicha radiación debe atravesar la atmósfera donde encuentra diferentes obstáculos que la retienen o la reflejan, de manera que solo llega aproximadamente una tercera parte, bien sea como radiación directa (R_{dir}) o como radiación difusa (R_{dif}), cuya suma constituye la radiación global (R_g), es decir: $R_g = R_{dir} + R_{dif}$.

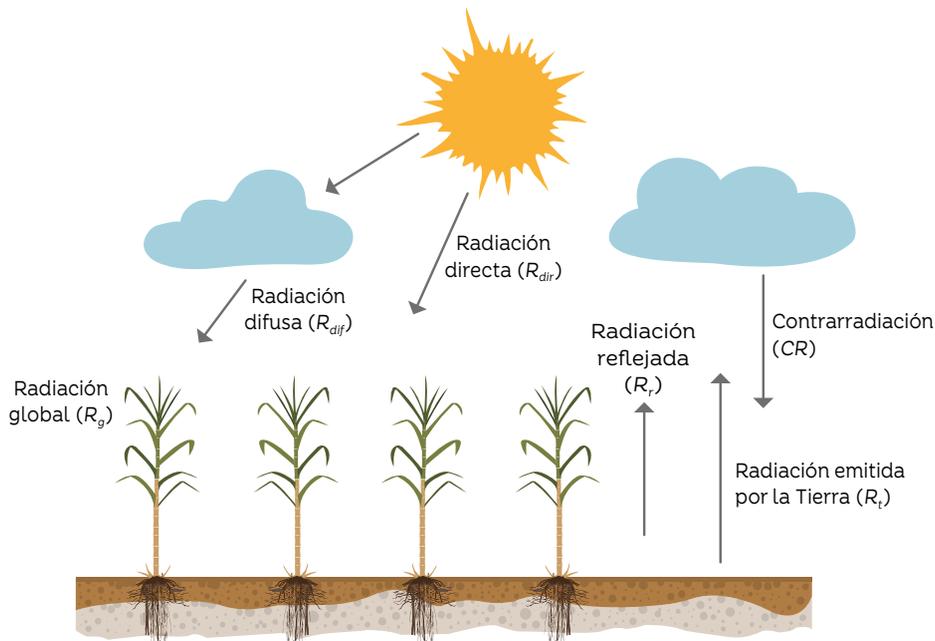
Dependiendo principalmente del color y la rugosidad de la superficie sobre la que incide la radiación, una parte de ella es reflejada en una proporción determinada por el coeficiente de reflexión (r) de la superficie: $R_r = r * R_g$, siendo el flujo neto de radiación de onda corta: $R_g (1 - r)$.

De igual manera, de la radiación emitida por la Tierra (R_t), la parte que es devuelta por la atmósfera a la superficie, conocida como contrarradiación (CR), contribuye al flujo neto que ingresa; por tanto, la radiación terrestre efectiva (R_b) se determina como:

$$R_b = R_t - CR \quad (3.33)$$

así, la radiación neta se calcula como:

$$R_n = R_g (1 - r) - R_b \quad (3.34)$$



► FIGURA 3.17. Esquema del cálculo de la radiación neta que llega a la Tierra.

Método aerodinámico

Permite calcular la evaporación (E) desde una superficie de agua libre utilizando una ecuación tipo Dalton de la forma:

$$E = a * f(V) * (P_{us} - P_{ur}) \quad (3.35)$$

De acuerdo con Penman, la evaporación desde una superficie de agua se define como $E = 0.35 * [0.5 + (V_2/160)] * (P_{us} - P_{ur})$ mientras que desde un cultivo es $E = 0.35 * [1.0 + (V_2/160)] * (P_{us} - P_{ur})$

donde, a es un coeficiente empírico, V_2 es la velocidad del viento a 2 metros sobre el nivel del suelo (km/día), P_{us} corresponde a la presión de vapor a saturación (milibares, mb, a temperatura ambiente) y P_{ur} es la presión real de vapor (mb). La humedad relativa del aire es $HR = (P_{ur}/P_{us}) * 100$.

Método combinado

Para superar el enfoque unilateral de los métodos anteriores que consideran solamente la velocidad del viento o la radiación solar en el cálculo de la evaporación y la evapotranspiración potencial, Penman (1948) citado por Allen *et al.*, (2006) propuso el método combinado que reúne el balance de energía y el método aerodinámico.

$$E(\text{mm/día}) = \frac{\left[\left(\frac{D}{G} \right) * (R_n + E) \right]}{\left(\frac{D}{G} \right) + 1} \quad (3.36)$$

donde, E es la evaporación, D es la pendiente de la curva de la presión de vapor a saturación con respecto a la temperatura ambiente ($\text{mb}/^\circ\text{C}$), G es la constante psicrométrica ($\sim 0.49 \text{ mb}/^\circ\text{C}$) y R_n es la radiación neta ($\text{cal}/\text{cm}^2.\text{día}$).

Uso de fórmulas empíricas

Los modelos matemáticos para la programación del riego se basan en uno o más factores climáticos para estimar la evapotranspiración real o potencial, de manera que las fórmulas son útiles sólo en las regiones para las cuales fueron desarrolladas. Como ejemplos se pueden mencionar las fórmulas de Thornthwaite, Blanney–Criddle, Christiansen y Hargreaves.



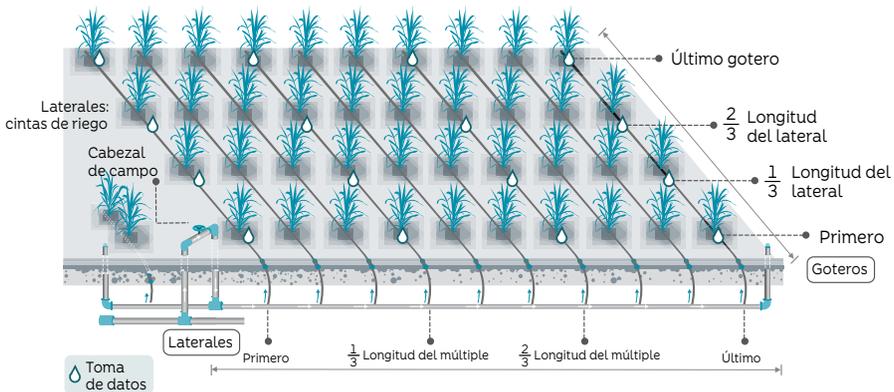
Evaluación del riego

Para garantizar la eficiencia del riego es necesario hacer un monitoreo constante de los caudales aplicados y la presión de trabajo de los goteros. Se recomienda que en cada evento el regador transite los surcos con el fin de observar obstrucciones de los goteros y reparar fugas en los laterales.

Las mediciones del caudal y la presión en el riego por goteo, así como los parámetros de evaluación de la eficiencia del sistema se basan en la metodología de Merriam y Keller (1978) y en las prácticas estandarizadas de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas, ASAE EP-458 (revisada por Lamm *et al.*, 1997) y ASAE EP-405.1 (ASAE, 1988; R2003; R2014).

El objetivo es verificar el funcionamiento hidráulico del sistema de riego, para lo cual se toman como referencia los parámetros definidos en el diseño hidráulico y el diseño agronómico. La evaluación se realiza al inicio del ciclo de riego, requiere planificación y debe estar a cargo personal que conozca el sistema y su operación.

En cada sector de riego se deben medir los caudales de 16 goteros distribuidos en 4 laterales (Figura 3.18). Laterales y goteros se identifican con el mismo criterio: el primero, el último y aquellos que se encuentran a $1/3$ y $2/3$ de longitud del múltiple o del lateral. Cuando el sector está en un terreno plano el cabezal de campo se encuentra en el centro del múltiple y el caudal se mide en uno de los lados del múltiple, de preferencia en el área que presente más irregularidades en la pendiente del terreno. Como regla general se acepta que los goteros funcionan bien si la diferencia de caudal entre ellos es $<10\%$ del indicado por el fabricante.



► **FIGURA 3.18.** Esquema para la toma de datos en la evaluación de riego por goteo.

Coeficiente de uniformidad de campo, CU_c

Se calcula en cada sector de riego siguiendo las indicaciones de muestreo dadas para la medición del caudal.

$$CU_c = \frac{q_{25\%}}{q_{prom}} \quad (3.37)$$

donde, CU_c es el coeficiente de uniformidad de caudales en el campo y se expresa en unidades decimales; $q_{25\%}$ es el caudal promedio del 25% de las lecturas más bajas (L/h) y q_{prom} es el caudal promedio de todas las lecturas (L/h).

Para evaluar la uniformidad estadística de la tasa de descarga de los emisores del sector (U_s) se requiere el coeficiente de variación de la descarga del emisor (V_{qs}).

$$V_{qs} = \frac{S_q}{q_{prom}} \quad (3.38)$$

donde, S_q es la desviación estándar

$$S_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n q_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n q_i)^2}{n-1}}$$

$$q_{prom} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

así,

$$U_s = 100 (1 - V_{qs}) \quad (3.39)$$

El Cuadro 3.7 compara la uniformidad del caudal en un sistema de riego por goteo con base en los indicadores calculados con las metodologías de la ASAE EP-405.1 (ASAE, 1988; R2003; R2014) y la desarrollada por Merriam y Keller (1978).

► **CUADRO 3.7.** Comparación de uniformidades para un sistema de riego por goteo.

Clasificación	ASAE (2003)		Merriam y Keller (1978)
	U_s	CU	CU
Excelente	100-95	100-94	>90
Bueno	90-85	87-91	80-90
Regular	80-75	75-68	70-80
Pobre	70-65	62-56	<70
No aceptable	<60	<50	-

Coeficiente de uniformidad de presiones, CU_h

Las presiones se miden con manómetros en los mismos puntos donde se miden los caudales. Una vez se ordenan los valores de presión en forma decreciente, se aplica la fórmula propuesta por Merriam y Keller (1978):

$$CU_h = \left[\frac{P_{25\%}}{P_{prom}} \right]^x \quad (3.40)$$

donde, CU_h es el coeficiente de uniformidad de presiones, $P_{25\%}$ es la presión promedio de la cuarta parte con más baja presión del emisor, P_{prom} es la presión promedio de todas las lecturas y x es el exponente de descarga del emisor.

La emisión y la presión de los goteros debe ser uniforme a lo largo del múltiple y los laterales. Para evaluar el correcto funcionamiento del sistema es necesario determinar los coeficientes de uniformidad de caudales y presiones.



Mantenimiento del sistema

El propósito del mantenimiento preventivo es asegurar el buen funcionamiento de los goteros y la durabilidad del sistema de riego, evitando que los emisores se tapen. Los emisores pueden obstruirse por la presencia de sólidos suspendidos en el agua, precipitados de magnesio y calcio, óxidos, sulfuro de manganeso-hierro, algas, bacterias y raíces (Enciso *et al.*, 2004).

Con un buen mantenimiento de los componentes del sistema de riego por goteo, la mayoría deben durar de 15 a 20 años. El plástico del gotero, la manguera y los emisores en mezcla con inhibidores de ultravioleta alcanzan larga vida sin deterioro evidente. El costo total de remplazo de la tubería de goteo y los emisores se aproxima al 20% del costo total del sistema (Jensen, 1983; Schwankl *et al.*, 2000; Schwankl y Hanson, 2007. Citados por Nakayama *et al.*, 2007).

De acuerdo con Schwankl y Hanson (2007), los sistemas de filtración no eliminan todos los materiales suspendidos en el agua; debido al alto costo de la eliminación de partículas muy pequeñas, solo están diseñados para filtrar partículas de diámetro 10% mayor que el diámetro del orificio emisor. Los organismos que crecen en las tuberías, especialmente por acción de las bacterias, son difíciles de eliminar completamente porque producen películas adhesivas de pequeñas partículas. Gran variedad de algas muy pequeñas pasan los filtros y pueden quedar en las tuberías. Los tratamientos químicos pueden detener su proliferación pero los residuos pueden acumularse junto a otras partículas pequeñas y obstruir el sistema. Las partículas pequeñas son lo suficientemente ligeras, flotan y pueden ser transportadas por medio del agua cuando la velocidad del flujo es alta. Al final de los laterales la velocidad se reduce a la necesaria para suministrar el caudal requerido por los emisores, de modo que las partículas pequeñas se acumulan y asientan en el último tramo del lateral y pueden taponar los emisores.



Sistema de aplicación del agua, múltiple y laterales.

Limpeza del sistema de riego

El lavado de los laterales o líneas de riego debe ser un proceso continuo cuando se realicen reparaciones en la conducción. Inicialmente debe lavarse la tubería de conducción, luego los múltiples y finalmente los laterales. En los múltiples se deben abrir los tapones de lavado para que descarguen libremente las impurezas. De igual forma los laterales de riego deben lavarse uno a uno, dejando salir libremente los sedimentos.

Lavado de los laterales

Los laterales pueden lavarse uno a uno usando válvulas manuales o automáticas a fin de evacuar los sedimentos acumulados en ellos. Donde el agua presenta muchas partículas se recomienda hacer un lavado semanal, para lo cual son de gran ayuda las válvulas automáticas.

Según Keller y Bliesner (1990) la velocidad de lavado es de 0.3 m/s en los laterales; Schwankl y Hanson (2007) citados por Nakayama *et al.* (2007) afirman que la velocidad mínima debería ser de 0.3 m/s en el lateral, aunque puede subir a 0.6 m/s para descargar partículas grandes; una mayor velocidad de descarga ayuda a eliminar partículas en menor tiempo de lavado.

Limpeza de los goteros

El método más adecuado para la limpieza de los goteros es seguir un buen programa de mantenimiento (Koegelenberg *et al.*, 2002) (Cuadro 3.8). El uso de aire a presión no se recomienda y el agua a presión tiene posibilidades limitadas de limpieza.

Las obstrucciones en los goteros disminuyen si los laterales se ubican con las salidas de agua hacia arriba. El origen se detecta por el color en las salidas de los goteros: blancuzco sucio por carbonatos, negro grisáceo por microorganismos, ocre por hierro, etcétera (Reche, 1994).

Para evitar la intrusión de raicillas a los goteros y el lateral se pueden usar inhibidores del crecimiento y biocidas del suelo recién germinan las semillas. También se aplica el lavado por súper cloración, llenando las cintas con una dosificación de 400 ppm de cloro y dejándolas reposar durante toda la noche (Enciso *et al.*, 2004). Durante los recesos entre ciclos de riego es conveniente operar el sistema de vez en cuando para favorecer la duración de sus componentes (Reche, 1994). En el caso de líneas subterráneas la frecuencia de lavado en temporada de no riego debe ser mayor.

► **CUADRO 3.8.** Programa de mantenimiento de un sistema de riego por goteo.

Monitoreo y mantenimiento	Semanal	Mensual	Anual
Fugas en el sistema	✓		
Caudal del sistema (flujómetro)	✓		
Presión de funcionamiento al final de los laterales		✓	
Tratamiento con cloro (según la calidad del agua y el método de aplicación de cloro)		✓	
Válvulas de aire Presión en válvulas de control			✓
Evaluación del sistema de riego: uniformidad de caudal y presión en emisores			✓

Fuente: adaptado de Koegelenberg *et al.* (2002).

La experiencia de Schwankl y Hanson (2007) citados por Nakayama *et al.* (2007) muestra que es posible la recuperación de emisores parcialmente obstruidos, aunque teniendo un cuidado extremo para prevenir lesiones en las plantas. En Arizona consiguieron recuperar hasta un 90% el caudal de diseño de emisores que estaban obstruidos por lodos; utilizaron 100 mg/L de cloro y ácido sulfúrico durante 24 horas para bajar el pH a 2 y continuaron con la inyección de 1 mg/L de hipoclorito de sodio (NaOCl) a un pH de 7, lo cual ayudó a mantener el sistema operativo durante tres años de investigación (ver *Fertirrigación en el cultivo de la caña de azúcar*, p. 149).

Normas de seguridad

Las labores se deben realizar cumpliendo las normas de salud y seguridad en el trabajo. Algunos insumos son compuestos muy corrosivos, como ácidos fuertes, que desprenden vapores dañinos para la salud.

Recomendaciones generales (Martínez, 1998):

- Si utiliza productos orgánicos debe hacerles un tratamiento previo para evitar que su alto contenido de sólidos en suspensión provoque sedimentación y taponamiento en el sistema de riego.

- Instale letreros que indiquen la prohibición de beber agua de riego.
- Guarde los insumos (fertilizantes y otros productos químicos) en un lugar contiguo al centro de control, bajo llave. Instale letreros de advertencia que indiquen el almacenamiento de compuestos químicos tóxicos.
- No vierta a corrientes naturales de agua ni a canales de riego el volumen muerto que queda en los tanques de fertilización. Puede aplicar este residuo líquido a algún árbol o cerco vivo cercano.
- No use los envases vacíos para almacenar agua o víveres. Inutilice los contenedores y deposítelos en un lugar seguro. En el valle del río Cauca puede integrarse al programa que coordina Asocaña (www.asocana.org) para el manejo de envases que han contenido agroquímicos.

Referencias

- Alarcón M., S. y Cruz V., J.R. (2012). *Precipitación efectiva en el cultivo de la caña de azúcar para programar riegos mediante balance hídrico. Trabajo presentado en el VIII Congreso de la Asociación de Azucareros de Latinoamérica y el Caribe y IX Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar* de Institución Organizadora, Cali, Colombia.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.
- ASAE, Standard. EP 405.1 APR1988 (2014). Design and installation of Microirrigation Systems. 49085–9659, St. Joseph, MI 2014. USA, 10 p.
- Campos R., A. y Cruz B., D.M. (2012). *Respuesta de la caña al agua*. En: VIII Congreso de la Asociación Azucareros de Latinoamérica y el Caribe y IX Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar. Memorias. Septiembre 12–14, 2012, Vol. 1 p. 602–614. Cali, Colombia.
- Campos R., A. y Cruz B., D.M. (2014). Riego con caudal reducido en cultivos de caña de azúcar. Guía metodológica. Cenicaña. Cali, Colombia. Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar. Sistema de producción agrícola. 114 p.
- Campos R., A. y Cruz B., D.M. (2016). *Respuesta al agua*. En Viveros, C. A. (Ed.), *Características agronomicas y de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC)* 93–4418. (pags. 32–39). Cali: Cenicaña.

- Cenicaña. Programa de Agronomía. (2015). Área de suelos y aguas. Informe trimestral abril – junio 2015. Cali, Colombia. Manuscrito sin publicar.
- Cenicaña. Programa de Agronomía. (2017). Área de suelos y aguas. *Informe trimestral julio–septiembre 2017*. Cali, Colombia: Cenicaña. Manuscrito sin publicar.
- Cenicaña (1984). *Informe anual 1983*. Cali, Colombia. 88 pp.
- Cenicaña (1991). *Carta trimestral. Año 13. n.º 1*. Cali, Colombia.
- Cenicaña (2018). *Informe Anual 2017*. Cali, Colombia. 116 pp.
- Chang, J.H. (1971). *Climate and agriculture. An Ecological Survey*. Chicago. Aldine Publ. Co.
- Cruz, J.R. (2015). *Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca*. Cali, Colombia: Cenicaña.
- De la Fuente, A. (2006). *Programación del riego por goteo con tensiómetros*. Recuperado de <https://www.slideshare.net/ShitoRyu64/programacion-del-riego-con-tensiometros>.
- Enciso, J., Porter, D., Bordovsky, J. y Fipps, G. (2004). *Dándole mantenimiento a los sistemas de riego por goteo subsuperficiales*. Recuperado de: https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87057/pdf_1481.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hincapié G., E. (2018). *Uso de sensores para el control del riego*. Cali: Cenicaña.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corporación autónoma regional del Valle del Cauca (CVC). (2004). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca*. Tomo II. Bogotá.
- Karmeli, D. y Keller, J. (1975). *Trickle irrigation design*. Glendora, California. Rainbird Sprinkler Manufacturing Co.
- Keller, J. y Bliesner, R.D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. Caldwell, New Jersey: Blackburn Press.
- Koegelenberg, F.H., Reinders, F.B., van Niekerk, A.S., van Niekerk, R. y Uys, W.J. (2002). *Performance of surface drip irrigation systems under field conditions*. Water Research Commission (WRC). ARC– Institute for Agricultural Engineering. <http://www.wrc.org.za/Knowledge%20Hub%20Documents/Research%20Reports/1036-1-02.pdf>
- Lamm, F.R., Storlie, C.A. y Pitts, D.J. (1997). Revisión of EP 458: Field Evaluation of Microirrigation Systems. ASAE Paper N. 972070 presented at ASAE Annual International Meeting. Minneapolis, Minnesota. 21p.

- Lamm, F.R. (2002). *Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation*. Northwest Research– Extension Center of Kansas State University. In :International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands, December 2–5, 2002.
- Marín, L.M. (2011). *Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en grava*. (Tesis). Recuperado abril 25, 2018, de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7908/1/CB-0450286.pdf>
- Martínez B., L. (1998). *Manual de fertirrigación*. Chile: Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), Gobierno Regional de Atacama, Comisión Nacional de Riego e Instituto de Investigaciones Agropecuarias Centro Regional de Investigación Intihuasi (La Serena).
- Merriam, J.L. y Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. USA. Third edition. Utah State University. Logan, Utah. Editorial.
- Nakayama, F.S., Boman, B.J. y Pitts, D.J. (2007). *Maintenance*. Lamm, F. R., Ayars, J. E. y NaKayama, F. S. (Eds.). *Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management. Developments in Agricultural Engineering 13*. (pp 389 –430). Italia: Elsevier.
- Pizarro C. F. 1987. *Riegos Localizados de Alta Frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación*. Ediciones Mundi – Prensa. (pp 56–62). Madrid: España.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- Quintero D., R., García S., A., Cortés L., A., Muñoz A., F., Torres, J.S., Carbonell, J.A. y Osorio, C.A. (2008). *Grupos homogéneos de suelos del área dedicada al cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (segunda aproximación)*. Colombia: Cenicaña.
- Schwankl, L.J. y Hanson, B.R. (2007). *Surface Drip Irrigation*. En Lamm, R.F., Ayars, J. E. y NaKayama, F. S. (Eds.). *Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management. Developments in Agricultural Engineering 13* .(pp 431 –472). Italia: Elsevier.
- Reche, M. J. (1994). *Limpieza y mantenimiento de los sistemas de riego por goteo*. Madrid: Ministerio de pesca y alimentación. Rivadeneyra S. A. – Getafe.
- Rogers, D.H., Lamm, F.R. y Alam, M. (2003). *Subsurface drip irrigation system (SDI) Water Quality Assessment Guideline*. Kansas State University. 8 p. Recuperado 29 marzo de 2018 de: <https://www.ks-re.k-state.edu/sdi/reports/2003/mf2575.pdf>

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. y Raes, D. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Estudio FAO riego y drenaje 66. Recuperado abril 25, 2018, de <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

United States Department of Agriculture (USDA) y Natural Resources Conservation Service – NRCS. (1997). *Irrigation guide*. Washington D. C.: USDA y NRCS.

Yagüe, J.L. (1998). *Técnicas de riego*. 3.ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.

Símbolos y abreviaturas

Ac	Aporte capilar
A_h	Área humedecida por un emisor o gotero
A_s	Área sombreada por una planta
As	Área de un sector o módulo de riego
At	Área total de riego
B	Relación de Bowen
C	Agua de constitución de los tejidos vegetales
C_a	Coefficiente de agotamiento del cultivo, umbral de riego, factor de agotamiento o fracción de agotamiento
CE	Conductividad eléctrica
CE_a	Conductividad eléctrica del agua de riego
CE_e	Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo
C_g	Contenido de grava
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CLV	Calor latente de vaporización del agua
CR	Contrarradiación
CU_c	Coefficiente de uniformidad de caudales
CU_h	Coefficiente de uniformidad de presiones
C_v	Coefficiente de variación del gotero
d_g	Lámina bruta
d_n	Lámina neta
d_t	Profundidad efectiva del suelo
d_u	Lámina útil (aprovechable)
d_x	Lámina neta máxima
e	Eficiencia del sistema de riego
E	Evaporación

e_a	Eficiencia de aplicación
e_c	Eficiencia de conducción
e_d	Eficiencia de distribución (del agua en el campo de riego)
e_r	Eficiencia de riego
e_s	Eficiencia de almacenamiento
Es	Escorrentía superficial
ET	Evapotranspiración
ET_0	Evapotranspiración potencial
ET_c	Evapotranspiración real del cultivo
e_u	Eficiencia de uso
FR	Frecuencia de riego
G	Constante psicrométrica
h	Presión en el múltiple, a la entrada del lateral
h_a	Presión media de los goteros de un lateral de riego
h_{final}	Presión del último gotero de un lateral de riego
$h_{inicial}$	Presión del primer gotero de un lateral de riego
HR	Humedad relativa del aire
JR	Jornada de riego
K_l	Constante de un lateral de riego
K	Coefficiente de programación de los riegos
K_c	Coefficiente único de cultivo
K_p	Coefficiente del tanque evaporímetro
n	Número de emisores o goteros por planta
N	Número de sectores de riego
NR	Necesidad de agua neta
Pe	Precipitación efectiva
Per	Percolación
P_{prom}	Presión promedio de todos los emisores medidos
Pr	Precipitación
P_{us}	Presión de vapor a saturación
P_{ur}	Presión de vapor real o actual
P_w	Porcentaje de suelo humedecido
$P_{25\%}$	Presión promedio del 25% de las lecturas más bajas
q_a	Caudal medio de un conjunto de goteros
Q_l	Caudal del lateral
q_n	Caudal mínimo de un conjunto de goteros
Q_n	Caudal mínimo
q_{prom}	Caudal promedio de todos los emisores medidos

Q_s	Caudal del sector
$q_{25\%}$	Caudal promedio del 25% de las lecturas más bajas
r	Coefficiente de reflexión
R	Riego
R_{ad}	Energía de advección transportada al cultivo
R_{al}	Energía almacenada en el cultivo
RAS	Relación de absorción de sodio
R_{at}	Energía transferida a la atmósfera
R_b	Radiación terrestre efectiva
R_{dif}	Radiación difusa
R_{dir}	Radiación directa
R_E	Energía utilizada en evaporación
R_{fs}	Energía utilizada en fotosíntesis
R_g	Radiación global
RL	Fracción de lavado (fracción de riego para lavado de sales)
R_n	Radiación neta en el cultivo
R_r	Radiación reflejada
R_s	Energía transferida al suelo
R_t	Radiación terrestre
RT	Relación de transpiración
STD	Sólidos totales disueltos
T	Transpiración
TA	Tasa de aplicación
TR	Tiempo de riego
UE	Uniformidad de emisión de sistemas de riego
UE_d	Uniformidad de emisión de sistemas de riego en diseño
UE_e	Uniformidad de emisión de sistemas de riego en campo
UE_l	Uniformidad de emisión en laterales de riego
UE_s	Uniformidad de emisión en sectores de riego
U_s	Uniformidad de la tasa de descarga de emisores
V_a	Volumen de agua del suelo antes del riego
V_{es}	Volumen de agua de escorrentía
V_f	Volumen de agua entregado al campo de riego
V_{fc}	Volumen de agua almacenado a capacidad de campo
V_p	Volumen de agua de percolación
V_{qs}	Coefficiente de variación de la descarga de emisores
V_r	Volumen de agua por sector en un evento de riego
V_s	Volumen de agua almacenado en el suelo
V_t	Volumen de agua transpirado por un cultivo
V_o	Volumen de agua derivado en la toma o fuente

V_2	Velocidad del viento a 2 metros sobre el nivel del suelo
x	Exponente del gotero
ΔS	Diferencia en el contenido de humedad del suelo
θ_{wCC}	Humedad gravimétrica a capacidad de campo
θ_{wPMP}	Humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente
$\theta_{wHópt}$	Humedad gravimétrica al potencial hídrico óptimo del cultivo

Diseño hidráulico del riego por goteo



Introducción

Partiendo de la base de que el caudal es el principal parámetro hidráulico en el diseño de un sistema de riego por goteo, se presentan los conceptos hidráulicos y sus aplicaciones al diseño, siendo el cálculo de los diámetros de las tuberías la tarea principal para la estimación de las pérdidas de energía, las presiones disponibles y las necesidades de potencia.

Se parte de una revisión mínima de hidrostática, antes de entrar al tema del movimiento del agua en tuberías en el cual se presentan las principales ecuaciones para el cálculo de tuberías continuas y tuberías de salida múltiple. También, se describe el sector de riego, las tuberías que lo componen y la estimación de sus diámetros, con énfasis en tuberías de PVC y polietileno, mediante la aplicación de la ecuación de Hazen-Williams.

Además, se presentan las rutinas de cálculo de los diámetros del lateral y el múltiple de un sector de riego para terminar con el procedimiento general de diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo.

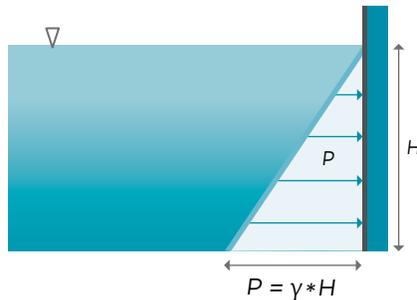


Relaciones entre presión, peso específico y altura

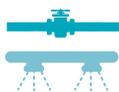
De acuerdo con Keller y Bliesner (1990), para el agua en reposo en un recipiente, la presión (P) en cualquier punto es igual al producto del peso específico del agua ($\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ a 20°C) y la altura del agua (H) por encima de ese punto.

En el esquema de la Figura 4.1 se muestra la presión ejercida por una columna de agua sobre una superficie plana vertical para explicar las relaciones entre P y H (Ecuación 4.1). En hidráulica en la columna se llama cabeza. La cabeza y la presión son simplemente formas diferentes de expresar lo mismo. La presión usualmente se expresa en kilopascales (kPa) o libras por pulgada cuadrada (psi) y la cabeza se expresa en metros de columna de agua, m.c.a. conociendo que $14.7 \text{ psi} = 10 \text{ m.c.a.}$ En el sistema dimensional FLT, la presión es una fuerza por unidad de área que resulta de remplazar γ por F / L^3 y H por L .

$$P = \gamma * H = \frac{F}{L^3} * L = \frac{F}{L^2} \quad (4.1)$$



► FIGURA 4.1. Presión ejercida por una columna de agua sobre una superficie plana vertical.



Tipos de tuberías

Una tubería es, independiente de su forma, un conducto por donde se transporta a presión un fluido. Desde el punto de vista de la hidráulica, las tuberías se clasifican en continuas (TC) y de salida múltiple (TSM). En las TC el caudal se mantiene constante a lo largo de su recorrido, mientras que en las TSM disminuye por efecto de las salidas.

La reducción del caudal se presenta en tuberías laterales de goteo, aspersión, compuertas y en sistemas de aplicación de agua en surcos mediante elevadores, como los usados en riego con caudal reducido. En el mercado existe una amplia oferta de tuberías de PVC (cloruro de polivinilo) y PE (polietileno) de uso agrícola que se identifican por su diámetro nominal (comercial) (Cuadro 4.1).

► **CUADRO 4.1.** Características de las tuberías de PVC existentes en el comercio.

Diámetro nominal, D_n (pulg)	Diámetro externo (mm)	Diámetro interno, D (mm)	Espesor de pared, E (mm)	Relación diámetro/espesor (RDE)
1/2	21.34	18.74	1.30	21
3/4	26.67	24.07	1.30	26
1	33.40	30.40	1.50	26
1 ¼	42.16	38.80	1.68	26
1 ½	48.26	44.56	1.85	26
2	60.32	56.62	1.85	32.5
2	60.23	57.19	1.52	41
3	88.90	84.56	2.17	41
3	88.90	85.42	1.74	51
4	114.30	109.82	2.24	51
6	168.28	161.68	3.30	51
8	219.03	210.43	4.30	51
10	273.05	262.35	5.35	51
12	323.85	311.23	6.31	51



Ecuaciones para el cálculo de tuberías

Ecuación de continuidad

Es una forma de expresar el Principio de conservación de la masa (Ecuación 4.2) y establece que, en una tubería continua, el caudal —producto del área de la sección y la velocidad del flujo— se mantiene constante a lo largo de su recorrido.

$$Q = V * A \quad (4.2)$$

donde, Q es el caudal, V es la velocidad del flujo y A es el área de la sección. Por lo general, las tuberías son de forma circular y el área está dada por $A = \frac{\pi * D^2}{4}$, donde D es el diámetro interno de la tubería.

Ecuación de Bernoulli

Expresa el Principio de conservación de la energía (Ecuación 4.3) y establece que la energía por unidad de peso en un fluido que circula por una tubería continua se mantiene constante a lo largo de su recorrido.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + H_F \quad (4.3)$$

donde, z es la energía potencial o de posición, $\frac{P}{\gamma}$ es la energía de presión, $\frac{V^2}{2g}$ es la energía de velocidad (g es la aceleración de la gravedad, igual a 9.81 m/s^2) y H_F son las pérdidas de energía totales en la tubería entre los puntos 1 y 2.

En la Ecuación 4.4, H_F es la suma igual a las pérdidas por fricción (h_f) más la sumatoria de las pérdidas por aditamentos o localizadas (Σh_{ad}).

$$H_F = h_f + \Sigma h_{ad} \quad (4.4)$$

Ecuación de Darcy–Weissbach

Se utiliza para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción o rozamiento (h_f) (Ecuación 4.5) que ocurren a lo largo de una tubería (Brater y King, 1976):

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (4.5)$$

donde, f es el coeficiente de rozamiento o fricción y L es la longitud de la tubería.

El valor de f se puede calcular con el Diagrama de Moody (Figura 4.2) en función del Número de Reynolds (R_e) y la rugosidad relativa de la tubería (ε/D), donde ε es la rugosidad absoluta, en mm. Por ejemplo, en tuberías plásticas $\varepsilon = 0.0015$ mm.

R_e muestra la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en un fluido, como se indica en la Ecuación 4.6 donde v es la viscosidad cinemática del fluido (para el agua a 20 °C, $v = 1.007 * 10^{-6}$ m²/s).

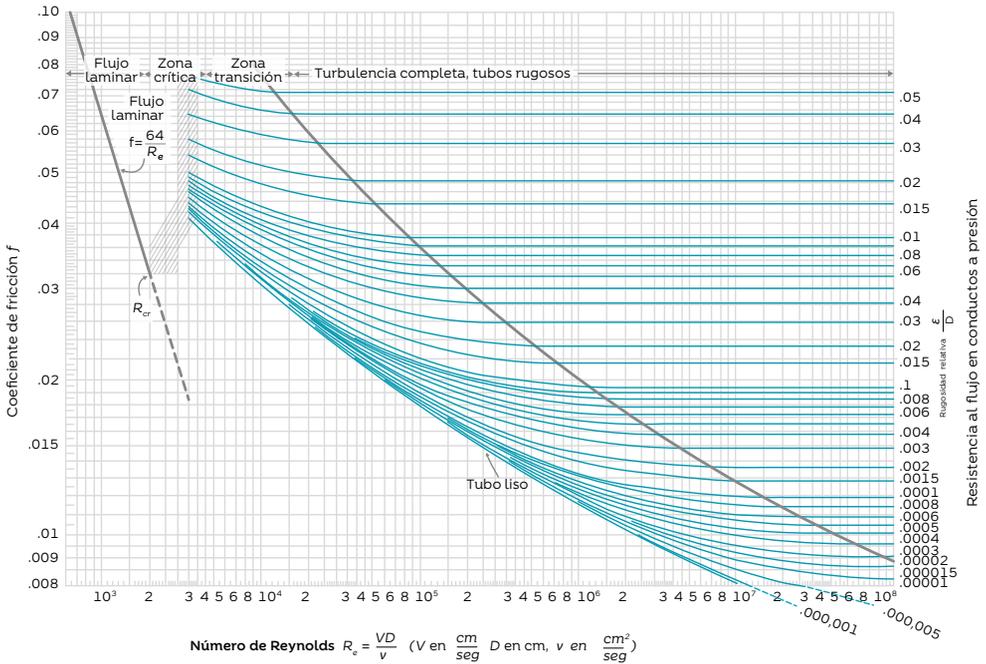
$$R_e = \frac{(V * D)}{v} \quad (4.6)$$

En el Diagrama de Moody se identifican cuatro zonas o regiones características.

- Zona de flujo laminar ($R_e < 2000$) donde f depende únicamente de R_e y $f = \frac{64}{R_e}$.
- Zona de transición ($2000 < R_e < 4000$) donde f tiene un valor indeterminado.
- Zona parcialmente turbulenta ($4000 < R_e < 10,000$) donde f es función de R_e y ε/D .
- Zona totalmente turbulenta ($R_e > 10,000$) donde f depende únicamente de ε/D .

Cuando se conoce R_e se puede obtener el valor de f para tuberías lisas y tuberías plásticas (PVC, PE) a partir de la Ecuación de Blasius.

$$f = \frac{0.3164}{R_e^{0.25}} \quad (4.7)$$



Material	ε en mm	Material	ε en mm
Vidrio, cobre, plástico, hule	0.0015	Cemento liso	0.003 a 0.008
Fierro fundido nuevo	0.005 a 0.01	Acero	0.04 a 0.10
Fierro fundido semioxidado	0.010 a 0.015	Asbesto - cemento	0.025
Fierro fundido oxidado	0.015 a 0.030	Concreto	0.16 a 2 o más

► **FIGURA 4.2.** Diagrama de Moody para determinar el coeficiente de fricción en tuberías.

Fuente: tomado de Sotelo (1994).

Ecuación de Hazen-Williams

En ingeniería esta ecuación es muy usada para resolver problemas de tuberías (Ecuación 4.8); expresa el caudal (Q , en m^3/s) transportado por una tubería circular como:

$$Q = 0.2785 * C * D^{2.63} * J^{0.54} \tag{4.8}$$

donde, J es la pérdida de carga unitaria, D es el diámetro interno de la tubería en metros y C es el coeficiente de descarga de Hazen-Williams, que para tuberías lisas de plástico tiene un valor de 150.



Pérdidas de energía por aditamentos o localizadas

Un aditamento es todo cambio en una tubería que modifica la magnitud o la dirección de la velocidad de la corriente, por ejemplo codos, conexiones en 'T', válvulas, entre otros.

Las pérdidas de energía localizadas (h_{ad}) están dadas por la ecuación 4.9:

$$h_{ad} = K * \frac{V^2}{2g} \quad (4.9)$$

donde, K es una constante adimensional propia del aditamento (determinada experimentalmente) y $\frac{V^2}{2g}$ es la energía de velocidad.

A continuación se describe la forma de estimar las pérdidas para los aditamentos más comunes en el riego por goteo.

Toma con rejilla

En las tomas en fuentes de agua superficiales, sean reservorios o corrientes naturales, es común colocar una rejilla que impida el paso de material grueso o flotante al conjunto de tuberías que componen el sistema de riego.

Para calcular estas pérdidas de energía (h_r) se utilizan las ecuaciones 4.10 (rejilla sumergida parcialmente) y 4.11 (rejilla sumergida totalmente). La rejilla puede ser vertical o inclinada en relación con la horizontal (ángulo θ).

$$h_r = K * \frac{V_o^2}{2g} \quad (4.10)$$

$$h_r = K * \frac{V_n^2}{2g} \quad (4.11)$$

donde, K es la constante de la rejilla, V_o es la velocidad de aproximación del flujo a la rejilla y V_n es la velocidad neta del flujo a través de la rejilla.

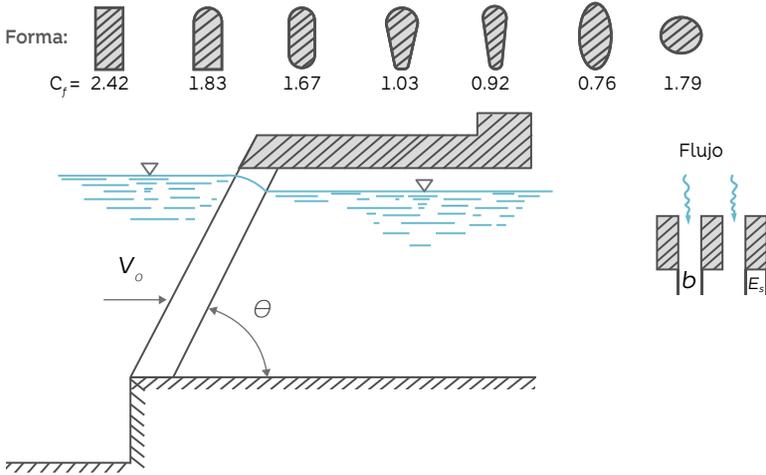
El valor de K para rejillas sumergidas parcialmente se calcula mediante la fórmula de Kirschmer (Figura 4.3 y Ecuación 4.12) y para rejillas sumergidas totalmente con la fórmula de Creager (Ecuación 4.13).

$$K = C_f * \left(\frac{E_s}{b}\right)^{\frac{4}{3}} * \text{sen}\theta \quad (4.12)$$

donde, C_f es el coeficiente de forma de las barras en la rejilla (por ejemplo, para barras rectangulares $C_f = 2.42$ y para circulares $C_f = 1.79$), E_s es el espesor de las barras y b es la separación entre barras.

$$K = 1.45 - 0.45 \left(\frac{A_n}{A_b} \right) - \left(\frac{A_n}{A_b} \right)^2 \quad (4.13)$$

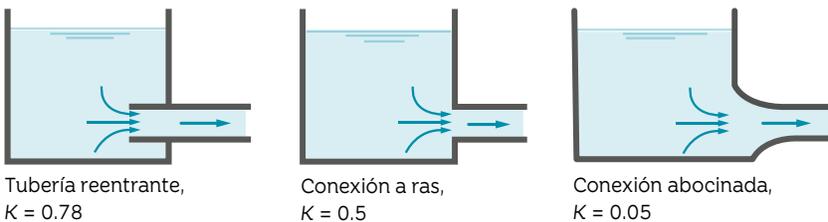
donde, A_n es el área neta de paso entre las barras y A_b es el área bruta de la rejilla.



► **FIGURA 4.3.** Coeficientes (C_f) aplicables a la fórmula de Kirschmer de acuerdo con la forma de las barras en una toma de agua con rejilla. Fuente: adaptado de Sotelo (1974).

Depósito a tubería

La constante K para el cálculo de pérdidas de energía por la entrada de agua desde un depósito a una tubería depende de la forma utilizada para el efecto (Figura 4.4).



► **FIGURA 4.4.** Esquema de entradas comunes de agua desde un depósito a una tubería y constante K de pérdidas de energía.

Tubería a depósito

En la descarga de una tubería a un depósito se pierde toda la energía de velocidad, es decir, $K = 1$.

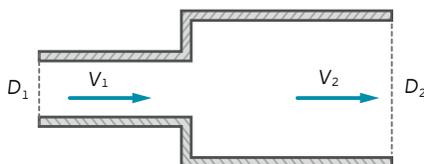
$$h_{ad} = \frac{V^2}{2g} \quad (4.14)$$

Ampliación brusca (bujé)

Como ocurre en la descarga de las bombas, en ocasiones es necesario ampliar la sección de flujo abruptamente, lo que provoca una pérdida de carga localizada donde el valor de K varía según se exprese en función de las áreas de entrada y salida del aditamento (A_1 y A_2) o en función de los diámetros de esas secciones (D_1 y D_2) (Figura 4.5).

$$K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (4.15)$$

$$h_{ad} = K * \frac{V_1^2}{2g} \quad (4.16)$$

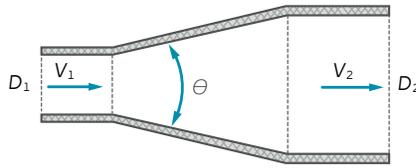


► FIGURA 4.5. Esquema de ampliación brusca o bujé.

Ensanchamiento gradual

El ensanchamiento gradual consiste en una transición cónica entre dos tuberías (Figura 4.6), con lo cual se reducen las pérdidas de energía localizadas (Cuadro 4.2). Un ejemplo es la transición posterior a la garganta de un venturi.

$$h_{ad} = K * \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (4.17)$$



► FIGURA 4.6. Esquema de ensanchamiento gradual entre dos tuberías de riego.

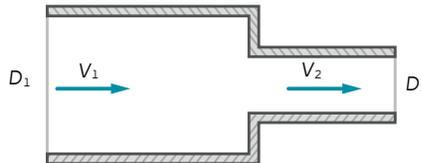
► CUADRO 4.2. Constante K de pérdidas de energía por transición cónica (ensanchamiento gradual) entre tuberías.

Relación de diámetros	Valor de K según el ángulo (Θ) de ensanchamiento						
	10°	20°	45°	60°	90°	120°	180°
$D_2/D_1 = 3$	0.17	0.4	0.86	1.02	1.06	1.04	1
$D_2/D_1 = 1.5$	0.17	0.4	1.06	1.21	1.14	1.07	1

Reducción brusca

La constante K de pérdidas de energía en una reducción brusca (Figura 4.7) varía de acuerdo con la relación de los diámetros de entrada y salida (Cuadro 4.3).

$$h_{ad} = K * \frac{V_2^2}{2g} \quad (4.18)$$



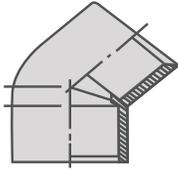
► FIGURA 4.7. Esquema de reducción brusca entre tuberías de riego.

► CUADRO 4.3. Constante K de pérdidas de energía por reducción brusca entre tuberías, según la relación de diámetros (D_2/D_1).

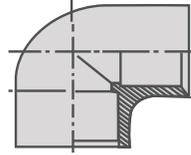
D_2/D_1	0.25	0.33	0.50	0.67	0.75
K	0.45	0.45	0.45	0.32	0.28

Codos

El valor de K depende del ángulo del codo (45° o 90°) y de la relación entre el radio (r) del codo y su diámetro interno (D) (Figura 4.8 y Cuadro 4.4).



Codo de 45° , $K = 0.3$



Codo de 90° , $K = 1.1$

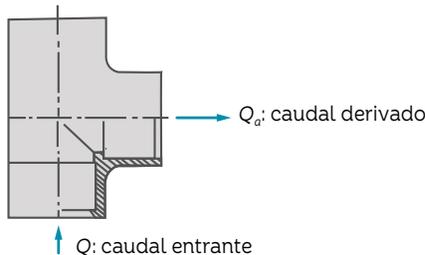
► **FIGURA 4.8.** Tipos de codos más comunes utilizados en conexiones de tuberías de riego.

► **CUADRO 4.4.** Constante K de pérdidas de energía por el uso de codos en tuberías.

Ángulo de codo, θ	Valor de K para diferentes valores de r/D				
	1	2	4	6	8
90°	0.50	0.30	0.25	0.16	0.15
45°	0.37	0.22	0.19	0.11	0.11

Conexiones en 'T'

En las derivaciones de agua de las tuberías, por ejemplo de conducción a distribución o de múltiple a lateral, o en las bifurcaciones, el valor de K depende de la relación entre el caudal entrante y el derivado (Q_a/Q) (Figura 4.9 y Cuadro 4.5).



► **FIGURA 4.9.** Esquema de reparto o derivación en 'T' de 90° en tuberías de riego.

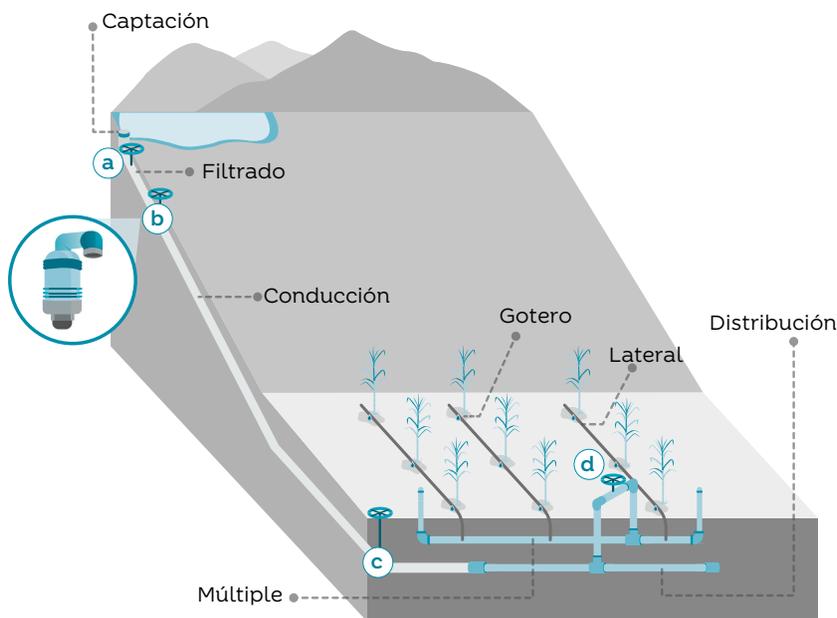
► **CUADRO 4.5.** Constante K de pérdidas de energía por conexión en 'T' según la relación de caudales (Q_a/Q).

Q_a/Q	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
K	0.95	0.88	0.89	0.95	1.10	1.28

Válvulas

Sus funciones en un sistema de riego por goteo se indican en la Figura 4.10, donde también se muestra el valor K para tres tipos de válvulas; las pérdidas dependen del grado de apertura de la válvula.

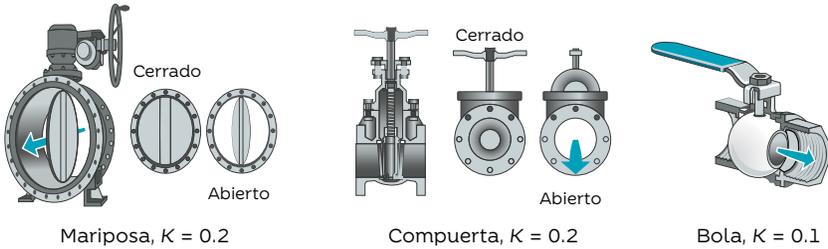
Válvulas principales



- a. Principal:** controla paso de agua al sistema (antes del filtrado).
- b. Alivio de aire** (función automática): protege el sistema del vacío cuando se cierra la válvula principal, permite salida de aire acumulado en tuberías.
- c. Purga:** evacua sedimentos en puntos bajos de tuberías.
- d. Control del riego** (en cabezal de campo): controla paso de agua al sector de riego.

► **FIGURA 4.10.** Válvulas principales en un sistema de riego por goteo con conducción por gravedad (esquema) y constante K de pérdidas de energía para tres tipos de válvulas. *Continúa.*

Tipos de válvulas



► FIGURA 4.10. Continuación.

Uniones

Las pérdidas de energía por uniones dependen del diámetro de la tubería y en tuberías de diámetro pequeño pueden oscilar entre $K = 0.2$ si $D = 25$ mm y $K = 0.35$ si $D = 100$ mm (Figura 4.11).



► FIGURA 4.11. Unión lisa para conexiones de tuberías en sistemas de riego.

💧 **Ejemplo.** Una estructura de uso común en los sistemas de riego por goteo son los cabezales de campo que controlan el riego de un sector. En una instalación donde el cabezal de campo consta de una 'T' de derivación, dos codos de 90°, una válvula de bola y una 'T' de reparto, ¿cuáles son las pérdidas por aditamentos si por la tubería de distribución de 4" circulan 18 L/s, en la 'T' se derivan 9 L/s hacia un cabezal en 3" y se llega a una 'T' de reparto?

Si en la 'T' de derivación se extrae la mitad del caudal ($Q_a / Q = 0.5$), interpolando $K = 0.92$. En adelante, cada codo $K = 1.1$, válvula $K = 0.1$ y 'T' de reparto $K = 1.4$.

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} = 1.57 \text{ m/s}; \quad \frac{V^2}{2g} = 0.126 \text{ m},$$

$$\Sigma K = 4.5;$$

$$\Sigma K * \frac{V^2}{2g} = 0.57 \text{ m}$$

En algunos casos, con el fin de ahorrar dinero en accesorios se construye el cabezal de campo con diámetros pequeños. Si en el caso anterior el cabezal se proyecta en 2" manteniendo los demás valores constantes excepto la velocidad, las pérdidas localizadas serían iguales a 2.76 metros y tendrían un impacto en los costos de energía durante la vida útil del proyecto.

Aunque en la mayoría de los proyectos de riego por goteo se manejan caudales y velocidades de flujo bajos, se debe tener en cuenta que, además de las pérdidas de energía localizadas, en los aditamentos se presentan empujes provocados por los cambios de dirección o magnitud de la velocidad de la corriente de agua que ponen en riesgo la estabilidad de la tubería. Donde esto ocurre es necesario anclar la tubería al suelo.



Pérdidas de energía en TSM

Una TSM o tubería de salida múltiple se caracteriza por la reducción del caudal a lo largo de su recorrido como resultado de las derivaciones de agua por las salidas. Debido a dicha reducción de caudal, también se reducen las velocidades y las pérdidas de energía. Para estimar las pérdidas de energía en TSM se siguen los mismos criterios que en tuberías continuas de igual material, diámetro y longitud, que transporta un caudal similar, pero afectadas por un factor de reducción de pérdidas por salida múltiple.

En TSM de diámetro constante se utiliza el factor de reducción de pérdidas de Christiansen (F), Ecuación 4.19, que es una función del exponente m de la velocidad que se utiliza para calcular las pérdidas de energía y del número de salidas N . Cuando se utiliza la Ecuación de Hazen-Williams (Ecuación 4.8) $m = 1.85$ y cuando se utiliza la Ecuación de Darcy-Weissbach (Ecuación 4.5) $m = 2$.

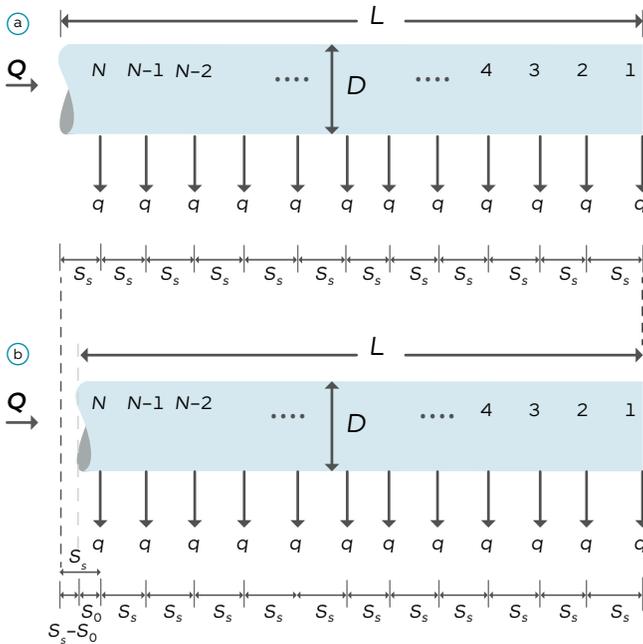
$$F = \frac{1}{m + 1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m - 1}}{6N^2} \quad (4.19)$$

La expresión anterior se utiliza cuando S_{s1} (primera salida medida desde la entrada de la tubería) se encuentra a una distancia igual a la distancia S_s (separación entre salidas) (Figura 4.12a).

Cuando S_{s1} es diferente de S_s entonces el factor F se reemplaza por un factor F' (Figura 4.12b).

$$F' = \frac{F - K}{1 - K} \quad (4.20)$$

$$K = \frac{1 - \frac{S_{s1}}{S_s}}{N} \quad (4.21)$$



► **FIGURA 4.12.** Esquema de una tubería de salida múltiple (TSM), donde Q es el caudal de entrada a la tubería, D es el diámetro interno, L es la longitud, S_s es la separación entre salidas y q es el caudal de una salida.

Anwar (1999) propuso un factor G de reducción de pérdidas por salida múltiple que permite el diseño de segmentos de tuberías de diámetro variable (tuberías telescópicas) con caudal remanente al extremo aguas abajo del tramo y con la primera salida colocada a una distancia $S_{s1} = S_s$. Cuando no existe caudal remanente, el factor G se reduce al factor F de Christiansen:

$$G = \frac{1}{Nm + 1(1 + r)m} * \left(\frac{1}{m + 1 \{ [N(1 + r) + 1]m + 1 - [Nr]m + 1 \}} - \frac{1}{2 \{ [N(1 + r) + 1]m + [Nr]m + 1 \}} + \frac{1}{12 \{ m[N(1 + r) + 1]m - 1 - m[Nr]m - 1 \}} \right) \quad (4.22)$$

$$r = \frac{Q_0}{Ql} \quad (4.23)$$

En la Ecuación 4.24, r es la relación entre el caudal remanente (Q_0) y el caudal total que entra a la tubería (Ql). Anwar propuso posteriormente un factor G ajustado (G_a), aplicable en los casos en que la primera salida está a una distancia completa de la separación entre salidas o a una fracción de ella.

$$x = \frac{S_{s1}}{S_s}; x \leq 1 \quad (4.24)$$

$$G_a = \frac{NG + x - 1}{N + x - 1} \quad (4.25)$$

como se observa, si $S_{s1} = S_s$, $x = 1$ y $G_a = G$.

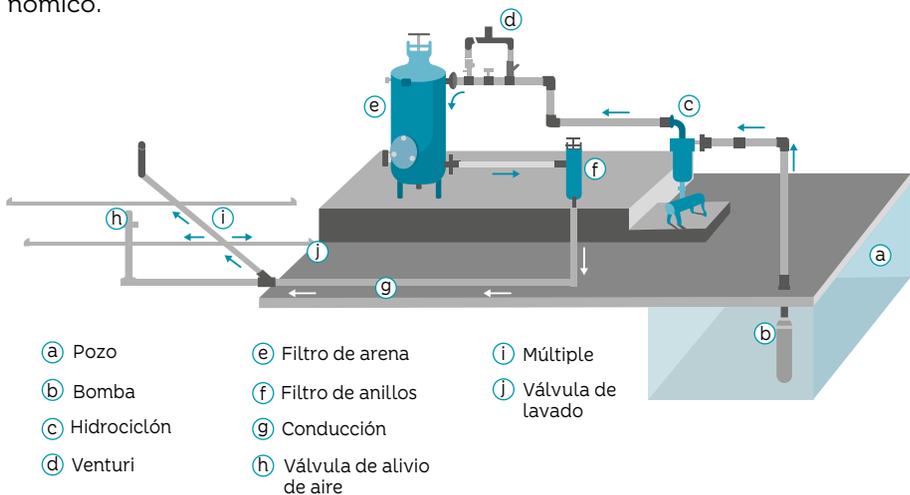


Diseño de las tuberías de conducción

La tubería de conducción transporta agua desde la fuente y en su recorrido la entrega a las diferentes tuberías de distribución. La conducción puede ser por bombeo o por gravedad.

Bombeo

Cuando la fuente de agua se encuentra a un nivel inferior al de las áreas de riego o cuando no existe una cabeza suficiente para impulsar el agua en las tuberías, es necesario instalar un sistema de bombeo que suministre la energía requerida por el sistema (Figura 4.13). En este caso, para estimar el diámetro de la tubería de conducción se puede emplear el Criterio de la velocidad o los Criterios del diámetro económico.



► **FIGURA 4.13.** Esquema de una instalación con conducción por bombeo en un sistema de riego.

Criterio de la velocidad

Establece que el valor de la velocidad en la descarga de la bomba esté comprendido entre 1 y 2 m/s y en la succión entre 0.5 y 1 m/s.

Criterios del diámetro económico, D_{ec}

Exigen que el valor del diámetro de la tubería de descarga dependa del caudal bombeado al sistema de riego (D en metros y Q en m^3/s).



Conexión a hidrante.

Un primer criterio corresponde al Criterio de Bresse:

$$D_{ec} = 1.2\sqrt{Q} \quad (4.26)$$

Una expresión más apropiada a los sistemas de riego es el Criterio de Marquardt (Sotelo, 1974) que modifica el de Bresse de acuerdo con la jornada de riego (JR):

$$D_{ec} = \sqrt[4]{\beta} * 1.2\sqrt{Q} \quad (4.27)$$

donde β es la relación entre la jornada de riego y 24 horas $\beta = \frac{JR}{24}$

💧 **Ejemplo.** Se trata de calcular el diámetro de una tubería de conducción en un sistema de bombeo para riego, con el fin de transportar un caudal de 36 L/s durante una jornada de riego de 18 h. El diámetro seleccionado debe ser el más conveniente en costos por tubería y por bombeo.

Entonces, con el Criterio de Bresse: $Q = 0.036 \text{ m}^3/\text{s}$, $\beta = 18/24 = 0.75$ y $D = 0.21 \text{ m} = \sim 8''$.

Adicionalmente, con el Criterio de las velocidades, asumiendo una velocidad de 1.5 m/s, el diámetro calculado sería de 6.88". Partiendo de estos valores, se debe seleccionar el diámetro (6" u 8") más conveniente de acuerdo con los costos de tubería y de bombeo. Cuando la instalación representa un costo significativo, el diámetro debe ser seleccionado estimando los costos iniciales de la tubería con su instalación y agregándolos a los de bombeo; bien sea llevando los primeros a costo equivalente anual o, los segundos a valor presente.

Una regla empírica que se aplica de manera preliminar para agilizar el proceso de diseño consiste en aproximar el diámetro de la tubería (en pulgadas) como la raíz cuadrada del caudal (en L/s) (Cuadro 4.6, Figura 4.14). Así, para un caudal de 9 L/s se puede sugerir el uso de una tubería de 3" de diámetro nominal.

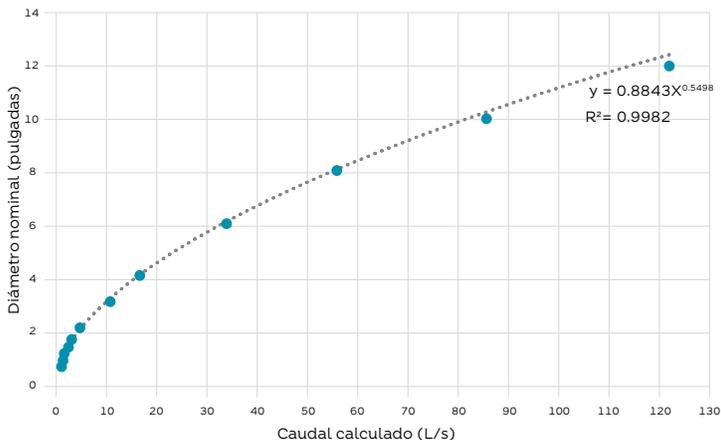
► **CUADRO 4.6.** Diámetro nominal, cuadrado del diámetro y caudal calculado (en L/s) para una velocidad de conducción de 1.6 m/s.

Diámetro nominal, D_n (pulgadas)	Cuadrado del diámetro, D_n^2 (pulgadas)	Caudal ¹ , Q (L/s)
1/2"	0.25	0.44
3/4"	0.56	0.73
1	1.00	1.16
1 ¼	1.56	1.89
1 ½	2.25	2.50
2	4.00	4.03
3	9.00	8.99
4	16.00	15.16
6	36.00	32.85
8	64.00	55.64
10	100.00	86.49
12	144.00	121.72

$$1. Q = 1.6 * (\pi / 4) * D_n^2$$

En el Cuadro 4.1 se observó que una tubería de 3" tiene un diámetro interno de 85.43 mm, que para un caudal de 9 L/s produce una velocidad de 1.57 m/s, valor en el rango recomendado entre 1.5 y 2.0 m/s en las tuberías de descarga. De la misma manera, en el Cuadro 4.6 y en la Figura 4.14 se observa que para un caudal de 16 L/s es adecuada una tubería de 4". El diámetro interno es de 109.82 mm y la velocidad de 1.69 m/s, que también se encuentra en el rango recomendado.

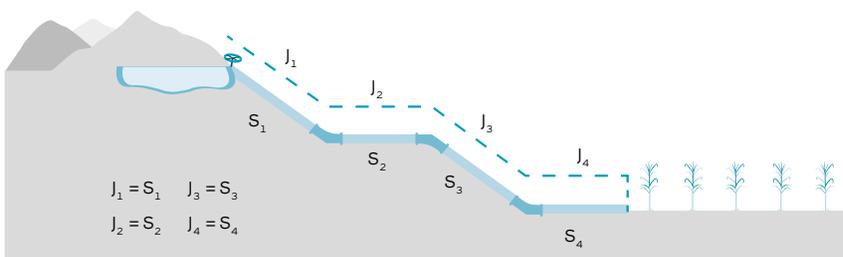
En el diseño de los cabezales de campo se debe tener especial cuidado al calcular los cambios en los diámetros de las tuberías; las decisiones basadas en ahorrar costos que incluyen cambios abruptos en los diámetros de las tuberías representan en el corto plazo más pérdidas de energía y mayores costos de bombeo.



► **FIGURA 4.14.** Relación empírica entre el diámetro nominal y el caudal calculado para una velocidad de 1.6 m/s en una tubería de PVC.

Gravedad

Cuando la conducción se realiza por gravedad es posible hacer una primera aproximación al diámetro de la tubería utilizando la Ecuación de Hazen-Williams (Ecuación 4.28). Suponiendo una pérdida de carga unitaria (J_i) igual a la pendiente del terreno (S_i), con el caudal (Q) conocido se realiza el cálculo del diámetro (D_i) y con la Ecuación de Bernoulli con pérdidas (Ecuación 4.3) y se revisa el valor estimado (Figura 4.15).



► **FIGURA 4.15.** Línea de alturas piezométricas.

$$D_i = \sqrt[2.63]{\frac{Q}{0.2785 * C * J_i^{0.54}}} \quad (4.28)$$

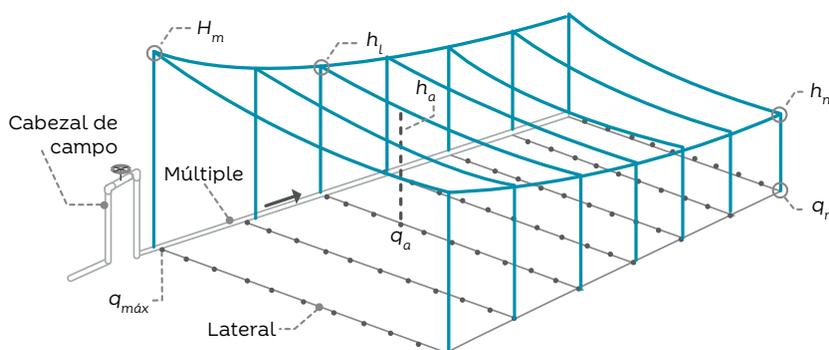


El sector de riego

Un sector de riego (Figura 4.16) está conformado por tuberías múltiples y laterales cuyos diámetros deben ser tales que la diferencia relativa de caudal en él sea menor o igual a 10% ($\frac{dq}{q} \leq 0.1$), es decir, la diferencia de caudal debe ser menor o igual a 10% del caudal medio de los goteros de ese sector, valor que se refleja en una diferencia relativa de presión de acuerdo con el exponente x del gotero ($\frac{dh}{h} \leq \frac{0.1}{x}$).

Por ejemplo, si $x = 0.5$, entonces $\frac{dh}{h} = 0.2$, lo cual indica que cuando el exponente del gotero es 0.5, para garantizar una diferencia de caudal de 10% se puede admitir una diferencia de presión de 20% en el sector. Por ejemplo, con una presión media en el sector de 10 m, la diferencia de presión admisible sería de 2 m.

La determinación de los diámetros del múltiple y el lateral se realiza para el sector de riego que, sobre el plano de distribución de los sectores, las mayores diferencias de presión parezcan más probables. Se debe tener presente que la diferencia de presión en el sector ($\Delta H'_s$) está compuesta por las diferencias de presión a lo largo del múltiple ($\Delta H'_m$) y a lo largo del lateral ($\Delta h'_l$).



► **FIGURA 4.16.** Plano de distribución de presiones y caudales en el múltiple y los laterales que conforman un sector de riego por goteo.

Fuente: adaptado de Part 623 Irrigation National Engineering Handbook, (USDA y NSRCS, 2013)

- H_m es la presión de entrada al múltiple,
- h_l es la presión de entrada al lateral medio,
- h_a es la presión media de los goteros del sector,
- h_n es la presión mínima de los goteros del sector,
- q_n es el caudal mínimo de los goteros del sector,
- $q_{máx}$ es el caudal máximo de los goteros del sector,
- q_a es el caudal medio de los goteros del sector.

Diseño hidráulico del sector de riego

En el diseño hidráulico del riego por goteo se debe tener presente el Principio de la división de flujo con el fin de aumentar la uniformidad del riego y disminuir los costos del sistema a través de la reducción de los diámetros requeridos para cubrir un área determinada.

En terreno plano, en un sector de riego, la diferencia máxima de presión ocurre entre el gotero más cercano al punto de entrada del agua y el gotero más alejado. Conectando estos goteros se encuentran el múltiple y el lateral. Como se explicó anteriormente, esta diferencia de presión admisible en el sector ($\Delta H'_s$) debe ser tal que la mayor diferencia de caudal sea menor o a lo sumo igual a 10% del caudal medio de los goteros del mismo sector, lo cual depende del valor del exponente del gotero. En este caso, el caudal medio es el suministrado por el gotero sometido a la presión media y no el promedio de los caudales de los goteros del sector. Esta diferencia de presión admisible en el sector se debe repartir entre el múltiple ($\Delta H'_m$) y el lateral ($\Delta h'_l$), de acuerdo con las relaciones siguientes:

$$\Delta H'_s = \Delta h'_l + \Delta H'_m \quad (4.29)$$

$$\Delta H'_m = 0.45 * \Delta H'_s \quad (4.30)$$

$$\Delta h'_l = 0.55 * \Delta H'_s \quad (4.31)$$

Ejemplo. ¿Cuáles son las $\Delta h'_l$ y $\Delta H'_m$ en un sector de riego cuya $h_a = 10$ m y el exponente del gotero es $x = 0.5$?

Si, $x = 0.5$ y $\frac{dq}{q} = 0,1$; entonces: $\frac{dh}{h} = \frac{0.1}{0.5} = 0.2$; $\Delta H'_s = 0.2 * 10 = 2$ m

$$\Delta H'_m = 0.45 * \Delta H'_s = 0.45 * 2 = 0.9 \text{ m}$$

$$\Delta h'_l = 0.55 * \Delta H'_s = 0.55 * 2 = 1.1 \text{ m}$$

Lo anterior indica que en el múltiple se puede tener una diferencia de presión de 0.9 m como máximo y en el lateral de 1.1 m.

El lateral

El lateral es la tubería de salida múltiple que lleva los goteros. Actualmente, en el riego por goteo de la caña de azúcar es frecuente el uso de cintas de goteo, de las cuales existe una alta diversidad en el mercado con calibres y caudales para diferentes espaciamentos. En los laterales, si q es el caudal del gotero, S_s la distancia entre goteros, L_l la longitud del lateral, entonces q_m es el caudal por metro o caudal unitario y Ql , el caudal del lateral. Se calculan como:

$$q_m = q/S_s \quad (4.32)$$

$$Ql = q_m * L_l \quad (4.33)$$

Cuando se decide instalar laterales con mangueras y goteros, ya sean estos insertados de fábrica o para insertar en campo, estas relaciones son igualmente válidas. Cuando se conoce q_m se puede establecer la tasa de aplicación (TA) dividiendo dicho caudal por la separación entre laterales (S_l), que es igual a la separación entre surcos sencillos en caña de azúcar, de la forma siguiente:

$$TA = \frac{q_m}{S_l} \quad (4.34)$$

En sentido estricto, en el denominador de la Ecuación 4.34, el valor de la separación entre laterales debe ser afectado por el porcentaje de suelo humedecido ($S_l * P_w$); no obstante, como se sabe, el valor de P_w depende del tipo de suelo y del caudal del gotero y puede alcanzar desde valores muy bajos en suelos livianos hasta un valor de 100 en suelos de texturas finas, con las distancias entre surcos frecuentes en caña de azúcar. Por lo tanto, se recomienda observar *in situ* el comportamiento del bulbo de humedecimiento después de varios eventos de riego para ajustar la TA .

Para el diseño del lateral en un sistema de riego se debe partir de la base de que la diferencia máxima de presión o diferencia de presión admisible en el lateral sea en todos los casos menor que 55% de la diferencia de presión en el sector (Ecuación 4.31). Conocida la $\Delta h'_l$ y la diferencia de elevación entre los extremos del lateral (Δz) es posible obtener el valor de las pérdidas de energía admisibles en el lateral (Δh_l), dependiendo de si el lateral está en terreno plano o pendiente.



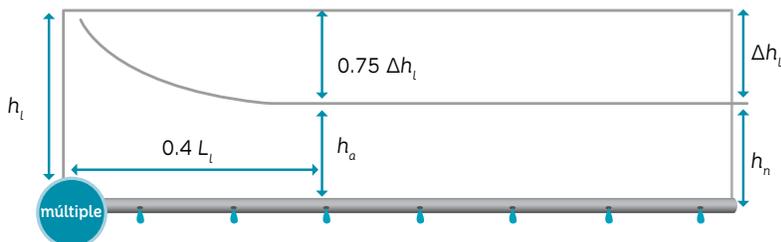
Instalación del múltiple y conexión con los laterales.

En los diseños de campo tradicionales en el cultivo de caña de azúcar se conforman tablones con longitud de surco aproximada de 120 m, que sería la longitud del lateral.

💧 **Ejemplo.** Un lateral de 16 mm de diámetro y 120 m de longitud, con goteros de caudal medio de 1 L/h espaciados cada 0.20 m, suministra un caudal unitario de 5 L/h-m, siendo el caudal del lateral de 600 L/h = 0.166 L/s.

El lateral en terreno plano

En terreno plano, la diferencia de presión en el lateral es debida únicamente a las pérdidas de energía, ya que $\Delta z = 0$, entonces $\Delta h_l = \Delta h'_l$. En un lateral, como en todas las tuberías de salida múltiple, el emisor que produce el caudal medio (q_a) se encuentra aproximadamente a una distancia de 40% de su longitud tomada desde el punto de conexión al múltiple. Hasta ese punto ocurren 75% de las pérdidas a lo largo del lateral, lo que permite calcular la presión de entrada al lateral como: $h_l = h_a + 0.75 * \Delta h_l$ (Figura 4.17).



► **FIGURA 4.17.** Plano de distribución de presiones en un lateral de riego por goteo en terreno plano (h_n se asume como la presión al final del lateral medio).

💧 **Ejemplo.** Si el lateral de la Figura 4.17 se encuentra en terreno plano y $h_a = 10$ m, la diferencia de presión admisible será $\Delta h'_l = 1.1$ m y las pérdidas unitarias de energía (J_l), calculadas mediante la Ecuación de Hazen-Williams usando $C=150$, $D=16$ mm, serán:

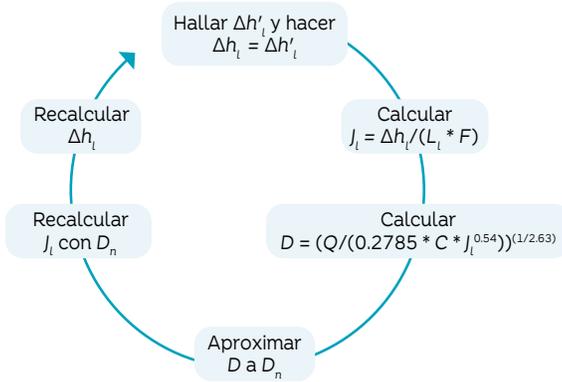
$$J_l = \sqrt[0.54]{\frac{Q}{0.2785 * C * D^{2.63}}} = 5.56 * 10^{-2}$$

Como el lateral tiene 600 goteros en 120 m y el factor de reducción de pérdidas $F = 0.35$ (usando $m = 1.85$ en la fórmula de Christiansen, Ecuación 4.19) las pérdidas totales serán:

$$\Delta h_l = J_l * L_l * F = 5.56 * 10^{-2} * 120 * 0.35 = 2.33 \text{ m}$$

El valor de la pérdida de energía obtenido supera el valor admisible de 1.1 m; por tanto, se puede seleccionar un diámetro superior, por ejemplo 18 mm y repetir el procedimiento de cálculo anterior, con lo cual se obtiene una pérdida $\Delta h_l = 1.32$ m, valor cercano al admisible, pero no suficiente. Probablemente, un diámetro de 20 mm sea el correcto.

Otra alternativa es consultar un catálogo de goteo para, manteniendo el diámetro de 18 mm, disminuir el caudal unitario cambiando el tipo de cinta; por ejemplo, reducir el caudal a $q_m = 3.74$ L/h.m, para valores de $Ql = 0.125$ L/s, $J_l = 1.85 * 10^{-2}$ y $\Delta h_l = 0.82$ m que cumplen con la condición. La Figura 4.18 resume el procedimiento de cálculo empleado para el diseño hidráulico de un lateral en terreno plano.



► **FIGURA 4.18.** Secuencia de cálculos para el diseño hidráulico de tuberías laterales de riego por goteo en terreno plano.

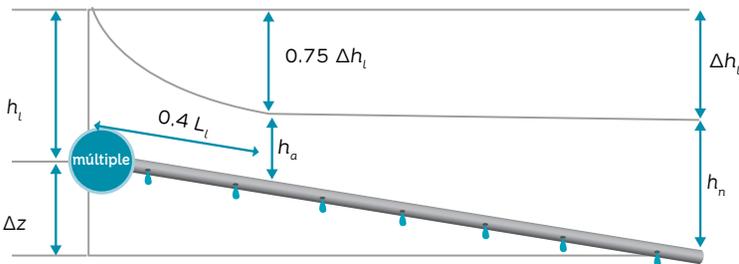
El lateral en pendiente (bajando)

Cuando el lateral se coloca en pendiente, sólo por necesidades muy particulares se ponen tramos muy cortos en sentido ascendente; la dirección recomendada es 'bajando'. La diferencia de nivel entre los extremos del lateral (Δz) interviene en la diferencia de presión admisible en el lateral ($\Delta h'_l$) y, por lo tanto, en las pérdidas admisibles de presión en el sector de riego (Δh_l) (Ecuación 4.35 y Figura 4.19).

$$\Delta z + h_l = h_n + \Delta h_l$$

$$\Delta h'_l = h_l - h_n = \Delta h_l - \Delta z, \text{ por tanto}$$

$$\Delta h_l = \Delta h'_l + \Delta z \quad (4.35)$$

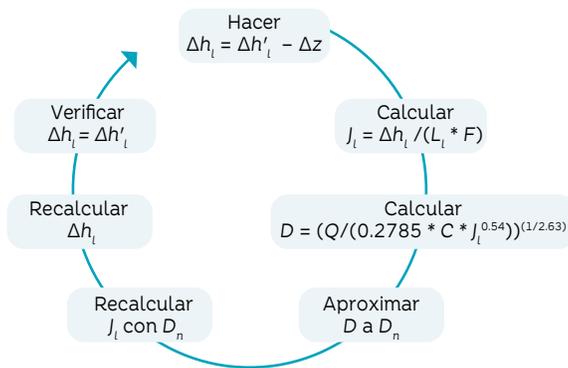


► **FIGURA 4.19.** Plano de distribución de presiones en un lateral de riego por goteo que opera en pendiente descendente (flujo bajando).

En el lateral descendente se observa que las Δh_l aparecen aumentadas con respecto al lateral en terreno plano, debido a que la pendiente se encuentra a favor. Si el lateral original del ejemplo anterior se colocara en una pendiente de surco de 2%, en 120 m se ganarían 2.4 m y las pérdidas admisibles serían de 3.4 m, que permitirían utilizar el lateral de 16 mm.

El lateral en pendiente ascendente (subiendo)

En el tramo que asciende las pérdidas de energía admisibles son iguales a las diferencias de presión admisibles menos la diferencia de nivel entre la conexión del lateral y su extremo ($\Delta h_l = \Delta h'_l - \Delta z$) (Figura 4.20).



► FIGURA 4.20. Secuencia de cálculos para el diseño hidráulico de tuberías laterales de riego por goteo en pendiente ascendente (flujo subiendo).

El múltiple

El múltiple es la tubería que entrega el agua a los laterales. En áreas planas debe ser conectado a la tubería de distribución en su punto medio y en terrenos con pendientes la conexión se debe hacer de manera que el tramo pendiente arriba sea más corto que el tramo pendiente abajo, buscando que las presiones en los extremos del múltiple sean iguales.

Por regla general, los laterales deben ser perpendiculares a la máxima pendiente, en lo posible siguiendo curvas de nivel. Sin embargo, en el cultivo de caña de azúcar en muchos casos predomina la dirección de surco en el sentido de la máxima pendiente, una decisión de diseño de campo que tiene consecuencias en el riego y la cosecha y debe ser analizada para cada caso en particular.

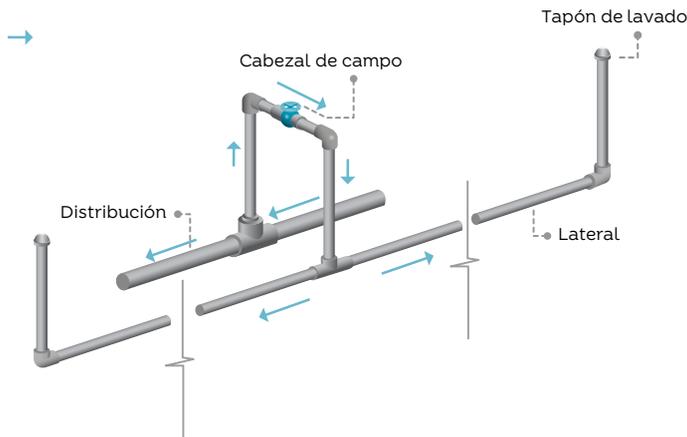
Conexión del múltiple

Como se sabe, el múltiple es una tubería de salida múltiple que recibe el agua de la tubería de distribución a través de un cabezal de campo y la entrega a los laterales de goteo.

Un cabezal de campo (Figura 4.21) conecta un sector de riego (múltiple y laterales de goteo) con la tubería de distribución y controla el paso de agua al sector. En este punto del sistema de riego los cambios bruscos de diámetro entre tuberías son inadecuados debido a las grandes pérdidas de energía que ellos ocasionan.

De igual manera que en el lateral, la presión media en el múltiple se encuentra a 40% de su longitud y hasta ese punto las pérdidas de energía equivalen al 75% del total perdido en esta tubería, con lo cual resulta fácil calcular la presión de entrada al múltiple, H_m .

Cuando el múltiple se encuentra en terreno plano, el cabezal de campo se ubica en el punto medio de la longitud del múltiple, de modo que el flujo se divide en dos tramos, lo que resulta muy favorable en costos por la reducción en los diámetros de la tubería.



► FIGURA 4.21. Esquema de un cabezal de campo en un sistema de riego por goteo.

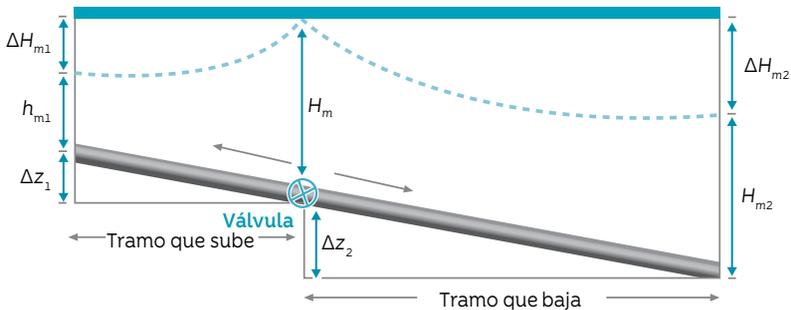
Cuando el múltiple se encuentra en terreno inclinado, a partir del cabezal de campo uno de los tramos sube y el otro baja (Figura 4.22). Donde la pendiente es alta es posible que sea necesario hacer la conexión en el extremo superior del múltiple o puede recurrirse al diseño de un múltiple telescópico para regular las presiones y lograr uniformidad de los caudales aplicados.

En el tramo 2 (flujo bajando) las pérdidas de energía admisibles (ΔH_{m2}) (Ecuación 4.36) son iguales a la diferencia de presión admisible en el múltiple ($\Delta H'_m$) más la diferencia de nivel entre la conexión del múltiple y su extremo (Δz_2). Esto constituye una ventaja económica debido a que la energía disponible al final del tramo 2 es mayor que en el punto de conexión y por tanto el diámetro de la tubería para un caudal dado es menor:

$$\Delta H_{m2} = \Delta H'_m + \Delta z_2 \quad (4.36)$$

En el tramo 1 (flujo subiendo) las pérdidas de energía admisibles se reducen por efecto de la ganancia de altura y a costa de la pérdida de presión (Ecuación 4.37).

$$\Delta H_{m1} = \Delta H'_m - \Delta z_1 \quad (4.37)$$



Para el tramo que sube

$$\Delta z_1 + H_{m1} + \Delta H_{m1} = H_m$$

$$\Delta H'_m = H_m - H_{m1}$$

$$\Delta H'_m = \Delta z_1 + \Delta H_{m1}$$

$$\Delta H_{m1} = \Delta H'_m - \Delta z_1$$

Para el tramo que baja

$$\Delta z_2 + H_m = H_{m2} + \Delta H_{m2}$$

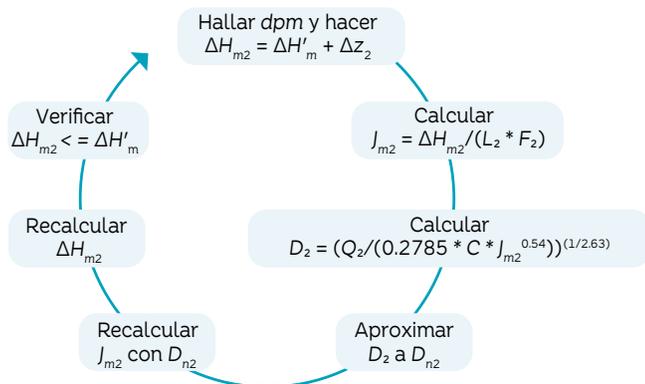
$$\Delta H'_m = H_m - H_{m2}$$

$$\Delta H'_m = \Delta H_{m2} - \Delta z_2$$

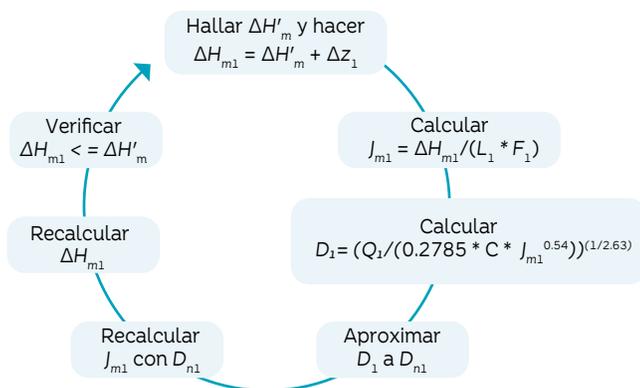
$$\Delta H_{m2} = \Delta H'_m + \Delta z_2$$

► FIGURA 4.22. Plano de distribución de presiones en un múltiple de riego por goteo en terreno pendiente.

Las secuencias de cálculo para el tramo 2 que baja (Figura 4.23) y para el tramo 1 que sube (Figura 4.24) comienzan con el cálculo de las diferencias de presión admisibles en ambos tramos ($\Delta H'_m$) y con ellas, las pérdidas admisibles en cada uno (ΔH_{m1} , ΔH_{m2}).



► **FIGURA 4.23.** Secuencia de cálculos para el diseño hidráulico del múltiple en terreno pendiente, tramo descendente (flujo bajando).



► **FIGURA 4.24.** Secuencia de cálculos para el diseño hidráulico del múltiple en terreno pendiente, tramo ascendente (flujo subiendo).



Secuencia general para el diseño hidráulico en un sistema de riego por goteo

En este aparte se presenta una síntesis de la secuencia general de cálculos y determinaciones que se requieren para el diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo que cumpla con eficiencia la función de suministrar oportunamente el agua que necesita el cultivo, haciendo un uso óptimo del recurso natural. El proceso concluye con el detalle de los materiales requeridos para la instalación, a partir de lo cual se elabora el presupuesto respectivo.

Se debe tener disponible la información obtenida durante la fase de planeación, en particular el caudal del sistema definido en función del área que se espera regar por goteo y el agua disponible en el predio.

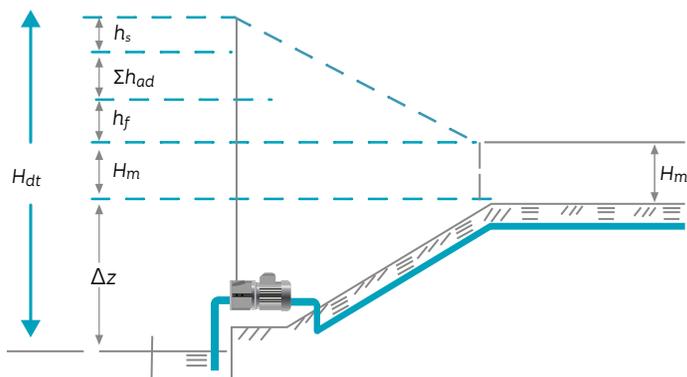
1. Sobre el plano de curvas de nivel en la cartografía del predio se distribuyen los sectores de riego de acuerdo con el número y el área determinados en la planeación del sistema.
2. Para los sistemas de conducción por gravedad: con el caudal del sistema y la(s) pendiente(s) del terreno, se iguala la pérdida de carga unitaria a la pendiente respectiva y mediante la Ecuación de Hazen-Williams se calcula el diámetro interno de la tubería de conducción y se aproxima al diámetro nominal más próximo. Para los sistemas de conducción por bombeo: el diámetro interno de la tubería de conducción se estima mediante el criterio de la velocidad o los criterios de diámetro económico.
3. Con el área del sector y la longitud del lateral (equivalente a la longitud del surco en cultivos de caña de azúcar) se calcula la longitud del múltiple, dividiendo el área del sector entre la longitud del lateral.
4. Con la longitud del múltiple se estima el número de salidas de esta tubería, dividiendo su longitud entre la distancia entre surcos (equivalente a la separación entre laterales en cultivos de caña de azúcar) y se calcula el caudal del múltiple como el producto del número de salidas por el caudal promedio del lateral.
5. Se determinan las diferencias de presión admisibles en el sector de riego de acuerdo con la presión media de los goteros del sector y el exponente del gotero.
6. Se determinan las diferencias de presión admisibles en el lateral y en el múltiple y las pérdidas de energía admisibles en ellos, según se encuentren en terreno plano o en pendiente.

7. Se calculan las pérdidas de carga unitarias en el lateral y en el múltiple.
8. Se calculan los diámetros internos del lateral y del múltiple y cada uno se aproxima al diámetro nominal superior más cercano si ellos se encuentran en terreno plano o en pendiente ascendente.
9. Con los diámetros nominales seleccionados para el lateral y para el múltiple se calculan nuevamente las pérdidas de carga en cada uno.
10. Se calcula la uniformidad de emisión del sector y se compara con la asumida o esperada; si la diferencia entre ellas es <2% se acepta el diseño pero si es >2% se debe modificar el diseño cambiando los diámetros de las tuberías o sus longitudes.
11. Con los diámetros nominales definitivos se calculan nuevamente los caudales del lateral y del múltiple y las pérdidas de energía en ellos para determinar la presión de entrada al múltiple.
12. Se determinan los diámetros nominales de la tubería de distribución y la tubería de conducción siguiendo la ruta que lleve al sector o módulo de riego más crítico, es decir el que está más alejado o más elevado con respecto a la fuente de agua.
13. Se calculan las pérdidas por fricción en la red de tuberías (desde el múltiple hasta la toma de agua en la fuente) y las pérdidas de energía localizadas, para luego sumar ambas.
14. En sistemas de bombeo:
 - Se calcula la altura dinámica total de la bomba (H_{dt} , en metros) (Ecuación 4.38 y Figura 4.25).

$$H_{dt} = \Delta z + H_m + h_f + \Sigma h_{ad} + h_s \quad (4.38)$$

donde

- Δz es la diferencia de nivel entre la superficie del agua en la fuente y la entrada al múltiple del sector crítico,
- H_m es la presión de entrada al múltiple,
- h_f son las pérdidas por fricción desde la entrada del múltiple del sector crítico hasta la fuente
- Σh_{ad} son las pérdidas por aditamentos, incluidas las pérdidas en los filtros y
- h_s son las pérdidas en la succión.



► **FIGURA 4.25.** Esquema para estimar la altura dinámica total de una bomba en el diseño hidráulico de un sistema de riego.

- Según Keller y Bliesner (1990), la potencia hidráulica (WP , Ecuación 4.39), la potencia de la bomba (BP , Ecuación 4.40) y la potencia del motor (P_m , Ecuación 4.41) se calculan con:

$$WP = \frac{Qs \cdot H_{dt}}{76} \quad (4.39)$$

$$BP = \frac{WP}{E_p} \quad (4.40)$$

$$P_m = \frac{BP}{E_m} \quad (4.41)$$

Donde E_p es la eficiencia de la bomba y E_m es la eficiencia del motor.

- Con base en las curvas características que relacionan el caudal y la altura dinámica total se selecciona la bomba como aquella que, para el caudal del sistema y la altura dinámica total, funciona en la región de máxima eficiencia.

Referencias

- Anwar, A.A. (1999). *Adjusted factor Ga for pipelines with multiple outlets and outflow*. *Journal of irrigation and drainage engineering*. ASCE. Vol 125 N° 6. (pp 355–359)
- Brater, E.F. y King, H.W. (1976). *Handbook of Hydraulics*. En: Hoffman, G., Evans, R.G., Jensen, M. E., Martin, D.L y Elliot, R. L. (Eds.). *Design and operation of farm irrigation system*. Second edition. ASABE. USA.
- Keller, J. y Bliesner, R.D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. New Jersey: The Blackburn Press.
- Sotelo, A.G. (1974). *Hidráulica General*. Volumen 1 Fundamentos. (pp 547) México: Editorial Limusa. S.A.
- USDA y NRCS. 2013. *PART 623 National Engineering*. Handbook Chapter 7 *Microirrigation*. Recuperado septiembre 22, 2018. <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/waterMgt/irrigation/NEH15/ch7.pdf>

Símbolos y abreviaturas

A_s	Área del sector
BP	Potencia de la bomba
C	Coefficiente de descarga de Hazen–Williams
D	Diámetro interno de la tubería
D_{ec}	Diámetro económico
D_n	Diámetro nominal o diámetro comercial
f	Coefficiente de rozamiento o fricción
F	Factor de reducción de pérdidas por salida múltiple de Christiansen
g	Aceleración de la gravedad
G	Reducción de pérdidas por salida múltiple de Anwar
h_a	Presión media de los goteros del sector
h_{ad}	Pérdida por aditamento o localizada
h_f	Pérdidas por fricción
h_l	Presión de entrada al lateral medio
h_n	Presión mínima de los goteros del sector
h_s	Pérdidas en la succión
H	Presión ejercida por una columna de agua sobre una superficie vertical plana
H_{dt}	Altura dinámica total de la bomba
H_F	Pérdidas de energía totales
H_m	Presión de entrada al múltiple o al sector de riego
J	Pérdida unitaria de energía
J_l	Pérdidas unitarias de energía en el lateral
J_m	Pérdidas unitarias de energía en el múltiple

JR	Jornada de riego
K	Coeficiente de pérdida por aditamento
L	Longitud de la tubería
L_l	Longitud del lateral
L_m	Longitud del múltiple
n	Número de goteros por metro
N	Número de salidas en una TSM
P	Presión
PE	Polietileno
Pm	Potencia del motor
PVC	Cloruro de polivinilo
P/γ	Energía de presión
P_w	Porcentaje de suelo humedecido
q	Caudal del gotero
q_a	Caudal medio de los goteros del sector
q_m	Caudal por metro
q_{max}	Caudal máximo de los goteros del sector
q_n	Caudal mínimo de los goteros del sector
Q	Caudal en la tubería
Ql	Caudal del lateral
RDE	Relación diámetro/espesor de una tubería
R_e	Número de Reynolds
S_s	Separación entre salidas
S_l	Separación entre laterales
TA	Tasa de aplicación
TC	Tubería continua
TSM	Tubería de salida múltiple
UE_s	Uniformidad de emisión del sector
WP	Potencia hidráulica
V	Velocidad del flujo en la tubería
$V^2/2g$	Energía de velocidad
z	Energía potencial o de posición
β	Relación entre la jornada de riego y 24 horas
γ	Peso específico del agua
Δh_l	Pérdidas de energía admisibles en el lateral
$\Delta h'_l$	Diferencia de presión a lo largo del lateral
ΔH_m	Pérdidas de energía admisibles en el múltiple
$\Delta H'_m$	Diferencia de presión a lo largo del múltiple
$\Delta H'_s$	Diferencia de presión del sector
Δz	Diferencia de elevación entre los extremos de un lateral o un múltiple
ε	Rugosidad absoluta de la tubería
ν	Viscosidad cinemática del fluido

Fertirrigación en el cultivo de caña de azúcar



Introducción

El fertirriego es la aplicación conjunta de agua y nutrientes en solución directamente a la zona radical del cultivo, utilizando como medio de transporte un sistema de riego, en especial el sistema de goteo.

El éxito de todo programa de fertilización –y, en especial, del programa de fertirriego– depende del diagnóstico correcto sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la calidad del agua utilizada y el estado del cultivo, entre otros factores agronómicos.

El estudio detallado de suelos y los resultados de los análisis físicos y químicos del suelo previos al establecimiento del cultivo, al igual que los del análisis foliar realizado durante la fase de rápido crecimiento, permiten establecer programas de fertilización con dosis ajustadas a las necesidades del cultivo, aún en fases avanzadas del desarrollo, lo cual es más fácil cuando se dispone de riego por goteo.

Por otra parte, los análisis de agua permiten conocer su calidad según su fuente o procedencia, sean aguas superficiales o de pozos profundos, y establecer los tratamientos necesarios para corregir las limitaciones tanto de riesgo por taponamiento del sistema como para la preparación de soluciones nutritivas, la solubilidad de las sales y la facilidad de absorción por el cultivo.

El dimensionamiento del equipo de fertirriego se realiza en función del área beneficiada y del plan de manejo del sistema de riego.



Análisis básicos

Los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar para su óptimo desarrollo y el contenido de nutrientes en el suelo y en el tejido foliar, junto con los resultados del análisis de calidad del agua, constituyen la información básica para las recomendaciones de fertirrigación.

Los análisis de suelo y foliar se usan para determinar la deficiencia, suficiencia o exceso de un nutrimento en cada sitio de producción (Muñoz, 2018). Los análisis de agua son necesarios para definir su tratamiento, a fin de usar agua de calidad adecuada para la preparación de soluciones nutritivas balanceadas y planificar el mantenimiento del sistema de riego, en especial del cabezal de riego, y los tratamientos de limpieza de la red de tuberías y los goteros; estos aspectos son determinantes en los resultados de eficiencia del fertirriego.

Análisis de suelo

De acuerdo con Cenicaña (2018), los resultados del análisis de suelo pueden ser utilizados en las recomendaciones de fertilización de la caña de azúcar para tres cortes consecutivos como máximo. Las muestras se deben tomar siguiendo los protocolos de laboratorio y con el tiempo suficiente para su análisis. Se toman antes de la siembra cuando se renueva el cultivo o inmediatamente después de la cosecha cuando se decide levantar la soca siguiente (ver: www.cenicana.org/servicios/analisis). En cultivos establecidos con fertirriego, se recomienda que las muestras de suelo para envío al laboratorio sean tomadas en el área del bulbo húmedo.

Las unidades de medida más utilizadas para expresar el contenido de nutrientes en el suelo y sus equivalentes en el agua (entre paréntesis):

$$\frac{\text{meq}}{\text{g}} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right), \text{ppm} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right), \% \left(\frac{\text{meq}}{100 \text{ mL}} \right)$$

Para la conversión de unidades:

$$\frac{\text{ppm}}{\text{pe (g)}} = \frac{\text{mg}}{[\text{L} * \text{pe (g)}]} = \frac{\text{meq}}{\text{L}}$$

$$\frac{\text{ppm}}{0.64} = \text{CE} * \left(\frac{\mu\text{mhos}}{\text{cm}} \right)$$

El peso equivalente (pe [gramos] = peso atómico / valencia) de los siguientes iones es: calcio (Ca^{+2}) = 20.04 g, magnesio (Mg^{+2}) = 12.15 g, sodio (Na^{+}) = 23.0 g, potasio (K^{+}) = 39.1 g, cloro (Cl^{-}) = 35.46 g, sulfato ($SO_4^{=}$) = 48.03 g, carbonato ($CO_3^{=}$) = 30 g y bicarbonato (HCO_3^{-}) = 61.01 g.

Análisis de tejido foliar

Este análisis permite conocer el balance de los nutrientes en la planta para determinar y corregir las deficiencias que limitan su producción. Las muestras corresponden a la hoja bandera (primera con cuello visible, TVD) y se toman entre 5 y 7 meses de edad de la caña de azúcar, por ser en esta etapa cuando las variedades presentan el máximo requerimiento de nutrientes. En el laboratorio se determina el contenido de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn). Las indicaciones de muestreo se pueden consultar en www.cenicana.org/servicios/analisis.

Análisis de calidad del agua

En la fertirrigación por goteo, el caudal de la solución fertilizante (solución madre) se inyecta al agua de riego para ser conducida, distribuida y aplicada a través del sistema de riego que, como se sabe, exige para su diseño agua de buena calidad en la fuente seleccionada (ver esquema: *Componentes de un sistema de riego por goteo*).

Las fuentes de agua disponibles para riego en el valle del río Cauca son superficiales (quebradas, ríos o reservorios) y subterráneas. En las primeras es frecuente la presencia de materiales en suspensión, tanto orgánicos como finos, y su uso en el riego por goteo exige la instalación de filtros de grava previos a los filtros de anillos o de mallas.

Por su parte, el agua de fuentes subterráneas, que generalmente presenta un pH más alto debido a una mayor concentración de sales –especialmente carbonatos– se caracteriza por contener hierro y manganeso, elementos que es necesario controlar porque favorecen la proliferación de bacterias productoras de ‘babas’ que taponan los filtros y pueden obligar a la suspensión del riego para realizar las labores de limpieza y mantenimiento.

Muestreo y análisis de agua

Las muestras para análisis de aguas superficiales deben ser tomadas bajo la superficie de las corrientes o de los reservorios. Para ello se deben utilizar recipientes limpios con una capacidad entre 1 L y 2 L, evitando la toma en sitios cercanos al fondo donde el contenido de sedimentos es más alto. Las muestras subterráneas deben ser tomadas después de 15 minutos de operación del pozo, conservadas en frío a una temperatura menor que 4 °C y enviadas inmediatamente al laboratorio para su análisis.

Comúnmente, los resultados del análisis de calidad del agua para fertirriego incluyen información sobre CE, pH, contenido de cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , aniones como Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, $\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^- , relación de absorción de sodio (RAS), sólidos totales suspendidos, nitrato (NO_3^-), sulfuro de hidrógeno (H_2S), Fe, Mn y poblaciones bacterianas.

Conductividad eléctrica

La salinidad medida por CE es utilizada para estimar la calidad del agua para riego. Las altas concentraciones de algunas sales minerales ocasionan daños por corrosión y obstrucción en los sistemas de distribución o tuberías de riego. La CE es un indicador del contenido de sólidos totales disueltos (STD) que corresponde al total de solutos no volátiles disueltos en el agua y se compone principalmente de sales solubles (Reed, 1996).

Con la instalación de un medidor de CE después del punto de inyección de la solución fertilizante es posible automatizar este proceso y suspender la inyección cuando la CE sobrepasa un valor predeterminado o permitirla cuando el valor está en los límites programados.

En el Cuadro 5.1 se presenta una guía general de la calidad del agua usada para riego según la salinidad expresada como CE (dS/m). Para evitar el crecimiento de plantas acuáticas, los niveles de salinidad deben permanecer tan cercanos a las condiciones naturales como sea posible (US EPA, 1973). Como se ha mencionado, la caña de azúcar es moderadamente sensible a la salinidad. El umbral económico de producción está dado por valores de CE en el extracto de saturación del suelo de 40 dS/m o más (Rozeff, 1995. Citado por Steduto *et al.*, 2012).

► **CUADRO 5.1** Clasificación de la calidad de agua de acuerdo con la concentración de sólidos totales disueltos en ella (STD) y su conductividad eléctrica (EC).

Agua: denominación	STD (ppm)	EC (dS/m)	Categoría
Agua dulce	<500	<0.6	Consumo humano Riego
Ligeramente salobre	500 – 1000	0.6 – 1.5	Riego
Salobre	1000 – 2000	1.5 – 3	Riego con precaución
Moderadamente salina	2000 – 5000	3 – 8	Primer drenaje
Salina	5000 – 10,000	8 – 15	Segundo drenaje Agua subterránea salina
Altamente salina	10,000 – 35,000	15 – 45	Agua subterránea muy salina
Salmuera	>35,000	>45	Agua de mar

Fuente: tomado de Hillel (2000).

Niveles de nitratos y nitritos en el agua

Los contenidos de nitritos en las fuentes de agua son bajos; los nitratos en aguas superficiales pueden causar eutrofización, definida como el incremento en el contenido de nutrientes, lo que causa crecimiento acelerado de algas y plantas acuáticas, pérdida de oxígeno disuelto, incremento de la turbidez y degradación general de la calidad del agua (Pierzynski *et al.*, 1994). Los niveles de nitratos requeridos para inducir la eutrofización varían dependiendo de la relación nitrógeno-fósforo. El exceso de estos elementos, cuando los niveles de fósforo son >0.10 ppm, favorece dicho proceso.

Presencia de iones

El agua superficial y el agua de pozo con frecuencia registran contaminación por bacterias que proliferan en medios con presencia de cloro, hierro, azufre y manganeso. En el Valle del Cauca el 85% de los pozos entregan agua con excesos del orden de 5 mg/L de hierro y <1 mg/L de manganeso como máximo (Medina, 1995. Citado por Marín, 2011). La inyección de hipoclorito de sodio (NaClO) o de cloro gaseoso (Cl₂) es una práctica usual para atenuar los efectos perjudiciales de las bacterias, tanto en pozos como en sistemas de riego.

En el Cuadro 5.2 se relacionan las características de calidad del agua con el potencial de obstrucción en sistemas de microirrigación, el efecto en el cultivo y la toxicidad específica de algunos iones. Las características generales de los filtros y los sistemas de inyección de fertilizantes más utilizados en fertirriego se encuentran en el aparte *Componentes del sistema de riego por goteo*.

► **CUADRO 5.2.** Guía de calidad del agua para sistemas de microirrigación.

Característica	Potencial de obstrucción		
	Bajo	Moderado	Alto
pH	<7.0	7 – 8	>8
Hierro (Fe), mg/L	<0.2	0.2 – 1.5	>1.5
Manganeso (Mn), mg/L	<0.1	0.1 – 1.5	>1.5
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S), mg/L	<0.2	0.2 – 2	>2
Sólidos totales disueltos (STD), mg/L	<500	500 – 2000	>2000
Sólidos suspendidos, mg/L	<50	50 – 100	>100
Poblaciones bacterianas, n.º/mL	<10,000	10,000 – 50,000	>50,000

Característica	Efecto en el cultivo		
	Bajo	Moderado	Alto
Conductividad eléctrica (CE), mmho/cm	<0.75	0.75 – 3	>3
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	<5	5.0 – 30	>30

Característica	Toxicidad específica de iones		
	Baja	Moderada	Alta
Boro (B), mg/L	<0.7	0.7 – 3	>3
Cloruro (Cl ⁻), meq/L	<4	4 – 10	>10
Cloruro (Cl ⁻), mg/L	<142	142 – 355	>355
Relación de absorción de sodio (RAS)	<3.0	3 – 9	>9

Fuente: tomado de Rogers et. al. (2003).



Tratamientos del agua en el riego por goteo

Los tratamientos para el control de los niveles de material inorgánico y orgánico en el agua de fertirrigación se pueden resumir en tres prácticas básicas: aireación y sedimentación, acidulación y cloración. Con estos tratamientos se pretende entregar agua de buena calidad al sistema de riego, a fin de evitar el taponamiento de los goteros.

Aireación

Una alternativa para remover altas concentraciones de hierro y manganeso consiste en airear el agua para promover su oxigenación; la aireación se puede lograr por aspersión o por circulación en cascada hasta el reservorio con el fin de oxidar estos elementos, antes de ser precipitados.

Acidulación

Cuando se preparan soluciones nutritivas, en la mayoría de los casos es necesario agregar pequeñas cantidades de ácidos nítrico, fosfórico o sulfúrico a fin de neutralizar parte del bicarbonato presente en la solución y bajar su concentración a 0.5 meq/L (Cuadro 5.3). Adicionalmente, por efecto de la acidulación el pH de la solución se reduce a un valor aproximado de 5.5 el cual, por balances posteriores, se aumenta a valores entre 5.8 y 6.0 en el punto de salida de los goteros. Con esta operación se evita la formación de precipitados de bicarbonato o se disuelven los presentes y se facilita la absorción por el cultivo de nutrientes disponibles en la solución y en el suelo.

► **CUADRO 5.3.** Características de ácidos comerciales de uso común. El aporte de nutrientes se expresa en porcentaje (peso/peso, *p/p* o peso/volumen, *p/u*).

Ácido agrícola	Peso 1 meq (mg)	Pureza (%)	Densidad (kg/L)	Aporte de nutrientes
Nítrico 52-55%	63	52	1.32	$N-NO_3^- = 11-12\% (p/p)$
Fosfórico 75%	98	75	1.6	$P_2O_5 = 54\% (p/u)$
Fosfórico 85%	98	85	1.69	$P_2O_5 = 62\% (p/u)$

Las necesidades de ácido se calculan según la relación:

$$\text{Necesidad de ácido} \left(\frac{\text{mL}}{\text{m}^3} \right) = \text{HCO}_3^- \text{ a neutralizar} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) * \text{peso}_{\text{meq del ácido}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{meq}} \right) * \frac{1}{\text{densidad del ácido} \left(\frac{\text{mg}}{\text{mL}} \right)} * \frac{100}{\text{pureza} (\%)} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \quad (5.1)$$

No es recomendable inyectar ácido fosfórico si el agua de riego tiene más de 50 ppm de Ca. En caso de usarlo debe inyectarse en altas concentraciones para bajar el pH a menos de 4, agregando el ácido al agua y nunca el agua al ácido; tampoco debe mezclarse el ácido fosfórico con cloro o guardarlos juntos en el mismo cuarto porque se forma un gas tóxico (Enciso *et al.*, 2004).

Cloración

La obstrucción causada por agentes biológicos en los sistemas de microirrigación es un problema que se presenta comúnmente por el uso de fuentes superficiales de agua que contienen bacterias. El agua tomada de pozos profundos presenta menos problemas biológicos, aunque en algunos lugares contiene bacterias reductoras de hierro que pueden corroer las partes metálicas del sistema de riego y, eventualmente, cuando se exponen al oxígeno, precipitar en los emisores (Nakayama *et al.*, 2007). El cloro en concentraciones bajas (1 a 5 ppm) elimina las bacterias y oxida el hierro, mientras que en concentraciones altas (100–1000 ppm) oxida la materia orgánica y la desintegra (Enciso *et al.*, 2004).

Se recomienda evitar la inyección de cloro al agua de riego que contiene fertilizantes, así como la inyección de cloro y ácido en el mismo punto y al mismo tiempo. En el caso de que sea necesario reducir el pH usando ácido se debe inyectar el cloro y el ácido en dos puntos diferentes con una separación mínima de 3 metros entre ellos (Netafim, 2011).

Algunos de los problemas frecuentes en el agua utilizada en sistemas de riego por goteo y los tratamientos sugeridos para evitarlos aparecen en el Cuadro 5.4.

► **CUADRO 5.4** Tratamientos de agua utilizados para evitar taponamientos en sistemas de riego por goteo.

Problema	Opciones de tratamiento
<p>Precipitación de carbonato (precipitado blanco).</p> <p>Nivel crítico: $\text{HCO}_3^- > 2.0$ meq/L, pH >7.5</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inyección continua de ácido: mantener pH entre 5 y 7. 2. Inyección periódica de ácido: mantener pH <4 por 30–60 minutos al día.
<p>Precipitación de hierro (precipitado rojizo).</p> <p>Nivel crítico: Fe >0.1 ppm</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Airear y sedimentar para oxidar el hierro (mejor tratamiento cuando la concentración de Fe en agua >10 ppm). 2. Inyección de cloro antes del filtrado a una tasa de 1 ppm por cada 0.7 ppm de hierro, para precipitar hierro. 3. Inyección de ácido para reducir el pH a 4 o menos por 30–60 minutos al día (realizar de forma periódica).
<p>Precipitación de manganeso (precipitado negro).</p> <p>Nivel crítico: Mn >0.1 ppm</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inyección de cloro antes del filtrado a una tasa de 1 ppm por 1.3 ppm de manganeso.
<p>Bacterias del hierro (limo rojizo).</p> <p>Nivel crítico: Fe >0.1 ppm</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inyección continua de cloro a una tasa de 1 ppm. 2. Inyección periódica de cloro: se debe garantizar en las puntas de los laterales una concentración de 10–20 ppm de cloro durante 30–60 minutos.
<p>Bacterias del azufre (limo baboso).</p> <p>Nivel crítico: sulfuro >0.1 ppm</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inyección continua de cloro a una tasa de 1 ppm por 4–8 ppm de sulfuro de hidrógeno (H_2S). 2. Inyección periódica de cloro: se debe garantizar en las puntas de los laterales una concentración de 1 ppm durante 30 a 60 minutos.
<p>Limo bacteriano y algas</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inyección continua de cloro a una tasa de 0.5–1.0 ppm. 2. Inyección de cloro a una tasa de 20 ppm durante 20 minutos al final de cada ciclo de riego.
<p>Sulfuro de hierro (similar a la arena negra)</p> <p>Nivel crítico: $\text{FeS} > 0.1$ ppm</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inyección continua de ácido para bajar el pH del agua a 5–7 y disolver el hierro.

Fuente: adaptado de Rogers *et. al.* (2003).

Ejemplo. En un agua de riego, el contenido de bicarbonato es de 3.3 meq/L; si se quiere garantizar un pH de 5.5 es necesario reducir el contenido de bicarbonato a 0.5 meq/L, lo cual significa neutralizar $3.3 - 0.5 = 2.8$ meq/L. Si se dispone de ácido nítrico de 52% de pureza, ¿qué cantidad de ácido se requiere?

$$\text{Necesidad de ácido nítrico} = 2.8 \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) * 63 \left(\frac{\text{mg}}{\text{meq}} \right) * \frac{1}{1320 \left(\frac{\text{mg}}{\text{mL}} \right) *}$$

$$\frac{1}{\frac{52}{100}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 257 \left(\frac{\text{mL}}{\text{m}^3} \right)$$



Necesidades de fertilización

Las necesidades de fertilización se pueden –determinar a partir de los requerimientos de nutrientes del cultivo para una producción esperada, el aporte de nutrientes del suelo y la eficiencia de la fertilización. En el fertirriego con riego por goteo el agua y el fertilizante diluido se localizan en una porción del sistema radicular del cultivo, de modo que en la relación de eficiencia se debe tener en cuenta el porcentaje de suelo humedecido. De acuerdo con lo anterior:

$$N_F = (R_N - S) * \left(\frac{P_w}{E_F} \right) \quad (5.2)$$

donde,

N_F son las necesidades de fertilización,

R_N son los requerimientos de nutrientes del cultivo para una producción esperada,

S es el aporte de nutrientes del suelo,

P_w es el porcentaje de suelo humedecido y,

E_F es la eficiencia de la fertilización.

La E_F se define como el menor requerimiento de un nutrimento por unidad de producto final obtenido (Muñoz, 2018); depende de factores como el tipo de suelo, la edad del cultivo y la calidad del agua de riego, y es independiente del sistema de riego empleado. Los suelos arenosos requieren mayor frecuencia de fertirrigación aunque en dosis

menores. Los requerimientos nutricionales varían con el estado de desarrollo de las plantas; así, durante los primeros estados se requieren menores cantidades de nutrientes que en los periodos de rápido crecimiento; por consiguiente, la fertirrigación es generalmente más efectiva en los periodos de rápido crecimiento de los cultivos.

En la ejecución del programa de fertilización se deben tener en cuenta las condiciones de humedad del suelo, el estado de desarrollo del cultivo y las fuentes de fertilizantes en cuanto a su compatibilidad y solubilidad en agua.

Formas de absorción de los nutrientes esenciales

Entre los elementos esenciales para el desarrollo de los cultivos, el hidrógeno, el oxígeno y el carbono están disponibles en el aire y el agua y forman la materia orgánica sintetizada por la fotosíntesis. Los demás elementos son tomados principalmente del suelo a través de la raíz, junto con el agua, y en la forma de iones. Los elementos esenciales para la nutrición de los cultivos y sus formas disponibles para las plantas se relacionan en el Cuadro 5.5.

► **CUADRO 5.5.** Nutrientes esenciales y su forma de absorción por las plantas.

Nutriente	Forma de absorción
Nitrógeno (N)	NH_4^+ , NO_3^-
Fósforo (P)	H_2PO_4^- (suelos ácidos) HPO_4^{2-} (suelos básicos)
Potasio (K)	K^+
Calcio (Ca)	Ca^{+2}
Magnesio (Mg)	Mg^{+2}
Azufre (S)	SO_4^{2-}
Hierro (Fe)	Fe^{2+} , Fe^{3+}
Manganeso (Mn)	Mn^{2+}
Cobre (Cu)	Cu^{2+}
Zinc (Zn)	Zn^{2+}
Boro (B)	H_3BO_3
Molibdeno (Mo)	MoO_4^{2-}

Fuente: tomado de Muñoz (2016).

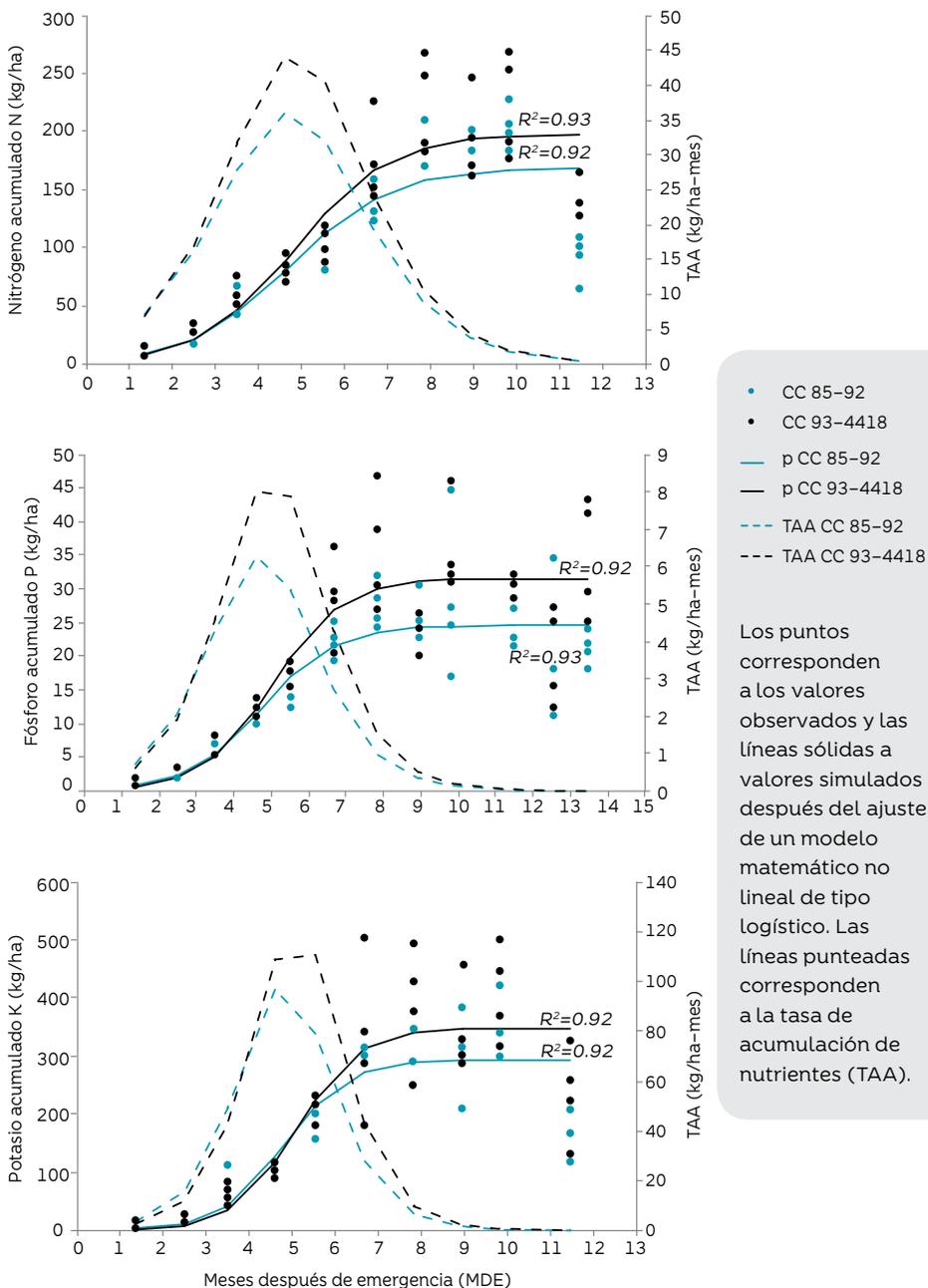


Curvas de absorción de nutrientes en la caña de azúcar

Las curvas de absorción se determinan mediante el seguimiento continuo de la acumulación de nutrientes de las principales variedades de caña de azúcar durante un ciclo de producción (13 meses en el valle del río Cauca). Se usan como referencia de los requerimientos nutricionales de las variedades en cada etapa de desarrollo y como información de base –junto con los análisis de suelo y tejido foliar– para definir las dosis de fertilizantes y las épocas de aplicación.

En la formulación de los programas de fertirriego probados por Cenicaja en asocio con los cultivadores de caña de azúcar se han utilizado como referencia las curvas de absorción de los elementos esenciales de las variedades CC 85–92 y CC 93–4418 (Figuras 5.1 para N, P, K y 5.2 para Fe, Zn, B) (Muñoz y López, 2016). A partir de las curvas se puede señalar, por ejemplo, que la tasa máxima de acumulación de N y K ocurre entre los 4 y los 5 meses después de la emergencia y que la tasa de absorción de estos macroelementos tiende a decrecer después de dichas edades.

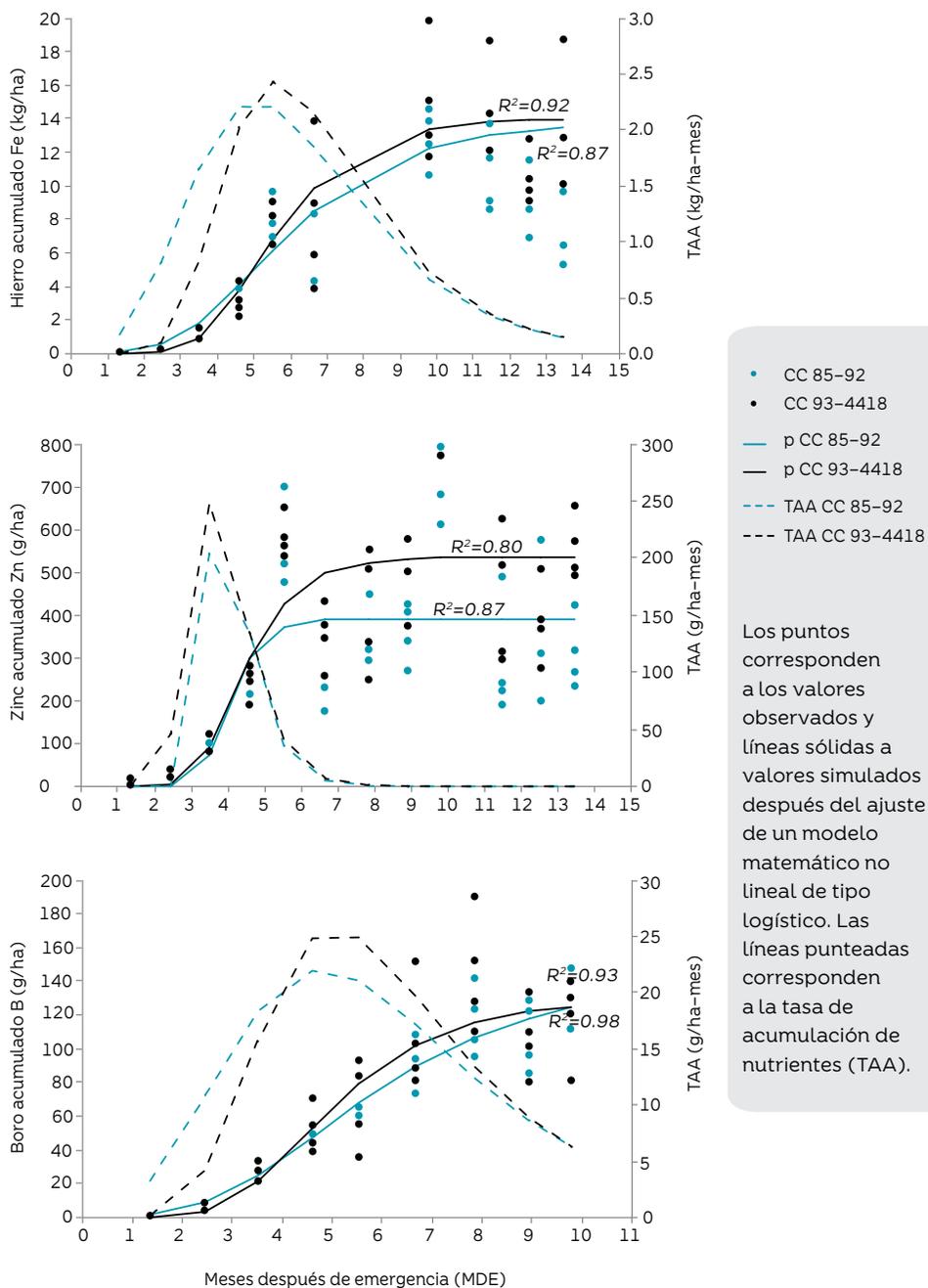
Vale anotar que la aplicación de cantidades altas de fertilizantes cuando la absorción de las plantas con sistema radical superficial es relativamente baja puede favorecer las pérdidas de sales nutritivas del suelo por lavado después de una lluvia intensa o un riego pesado.



Los puntos corresponden a los valores observados y las líneas sólidas a valores simulados después del ajuste de un modelo matemático no lineal de tipo logístico. Las líneas punteadas corresponden a la tasa de acumulación de nutrientes (TAA).

► **FIGURA 5.1** Dinámica de acumulación en el tiempo del nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en las variedades CC 85-92 y CC 93-4418.

Fuente: tomado de Muñoz y López (2016).



► **FIGURA 5.2** Dinámica de acumulación en el tiempo del hierro (Fe), zinc (Zn) y boro (B) en las variedades CC 85-92 y CC 93-4418.

Fuente: tomado de Muñoz y López (2016).

Épocas de aplicación de los fertilizantes

Cuando se selecciona el sistema de fertirrigación se debe tener en cuenta que los mejores resultados se alcanzan con la aplicación frecuente de los fertilizantes, lo que implica el fraccionamiento de la dosis total. La alta frecuencia de fertilización permite bajar la concentración de la solución madre, que no debe exceder las 700 ppm, siendo lo normal entre 200–400 ppm.

A modo de ejemplo, en cultivos hortícolas es común aplicar la solución nutritiva con cada riego y una frecuencia no mayor de tres días, mientras en frutales se hacen aplicaciones cada semana.

Frecuencia de aplicación de fertirriego en caña de azúcar

En el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca la frecuencia de aplicación del fertirriego puede ser diaria, semanal o quincenal, lo que permite ajustar la dosis a las necesidades temporales del cultivo y puede ayudar a corregir las deficiencias identificadas en el análisis foliar, cuando este se realiza en edades tempranas del cultivo.

Fraccionamiento de los fertilizantes

La práctica tradicional de fertilización de la caña de azúcar en el valle del río Cauca consiste en suministrar la dosis recomendada entre los 30 y 60 días del ciclo de cultivo, en una sola aplicación o fraccionada en dos aplicaciones.

En el fertirriego con riego por goteo el número de aplicaciones para completar la dosis recomendada puede ser mayor y abarcar distintas etapas del ciclo de cultivo. La tendencia de las curvas de absorción de N, P, K, Fe, Zn y B para las variedades de caña de azúcar CC 85–92 y CC 93–4418 (Muñoz y López, 2016) (ver Figuras 5.1 y 5.2), ha servido de base para proponer los planes de fraccionamiento de la fertirrigación ajustada a la edad del cultivo (Cuadro 5.6).

Fuentes de nutrientes

La selección de las fuentes fertilizantes utilizadas en fertirriego debe realizarse teniendo en cuenta el tipo de cultivo, las condiciones del suelo, la calidad del agua, la disponibilidad de los fertilizantes y su precio (Kafkafi y Tarchitzky, 2011). Los insumos deben ser de alta pureza, calidad, solubilidad y compatibilidad, con un pH aceptable; se pueden utilizar soluciones comerciales o prepararlas en la finca según las necesidades del cultivo.

► **CUADRO 5.6.** Ejemplo de un plan de fraccionamiento de la fertilización (porcentaje de la dosis total, kg/ha) en un cultivo de caña de azúcar con aplicaciones de fertirriego por goteo cada 15 días. Fraccionamiento definido con base en las curvas de absorción de nutrientes de las variedades CC 85–92 y CC 93–4418 en el valle del río Cauca, Colombia.

Época de aplicación del fertirriego: meses después de la emergencia (MDE)		Cantidad de nutrientes: fracción de la dosis total recomendada (%)					
Desde	Hasta	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Hierro	Zinc	Boro
1.0	1.5	5	6	3	1	1	2
1.5	2.0	4	7	4	4	2	2
2.0	2.5	6	8	7	8	2	2
2.5	3.0	8	8	9	13	2	2
3.0	3.5	10	9	11	15	2	5
3.5	4.0	10	9	12	15	2	8
4.0	4.5	11	9	12	13	10	10
4.5	5.0	11	9	11	10	10	13
5.0	5.5	10	9	10	8	15	15
5.5	6.0	9	9	8	6	18	15
6.0	6.5	8	9	7	4	18	14
6.5	7.0	7	8	6	3	18	12
		100	100	100	100	100	100

Macroelementos

Las principales fuentes de macroelementos recomendadas para utilizar en fertirriego, su aporte de N–P–K y las características de solubilidad en agua, porcentaje de insolubles y pH de la solución final se presentan en el Cuadro 5.7. La lista incluye fertilizantes simples (urea, MAP, DAP, MKP y KCl) y fertilizantes compuestos (NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_2SO_4 y KNO_3).

La calidad del insumo en términos de su aporte de macronutrientes (grado equivalente) se expresa en porcentaje (%N–%P₂O₅–%K₂O). Las cualidades de solubilidad se expresan por la relación peso/volumen (cantidad máxima de la sal fertilizante que puede disolverse en agua, en kg/L o kg/100 L) y por el tiempo requerido para la disolución completa (en minutos).

► **CUADRO 5.7.** Fuentes de macroelementos utilizadas en la fertirrigación con riego por goteo, características de solubilidad y pH de la solución.

Fuente y su grado equivalente (%N-%P ₂ O ₅ -%K ₂ O)	Cantidad máxima en agua a 20°C (kg/100 L)	Tiempo para disolver (min)	pH de la solución	Insolubles (%)
Urea (46-0-0)	105	20*	9.5	Escasos
Nitrato de amonio NH ₄ NO ₃ (33.5-0-0)	195	20*	5.6	-
Sulfato de amonio (NH ₄) ₂ SO ₄ (21-0-0)	43	15	4.5	0.5
Fosfato monoamónico (MAP), NH ₄ H ₂ PO ₄ (12-61-0)	40	20	4.5	11
Fosfato diamónico (DAP), (NH ₄) ₂ HPO ₄ (18-46-0)	60	20	7.6	15
Cloruro de potasio KCL (0-0-62)	34	5	7.0 - 9.0**	0.5
Sulfato de potasio K ₂ SO ₄ (0-0-53)	11	5	8.5 - 9.5**	0.4-4**
Fosfato monopotásico (MKP) KH ₂ PO ₄ (0-51.5-34)	213	-	5.5 ± 0.5	<0.1
Nitrato de potasio KNO ₃ (13-0-46)	31	0	10.8	0.1

* El tiempo de disolución es alto porque la temperatura de la solución cae a 0 °C.

** Intervalo de datos correspondiente a distintos análisis y fuentes.

Fuente: adaptado de Primary Industries: Agriculture (2000). Citado por Kafkafi y Tarchitzky (2011).

Desde el punto de vista de los fertilizantes, la solubilidad se define como la cantidad máxima de un sólido que puede disolverse en agua y se cuantifica en unidades de peso/volumen (kg/L). Para las aplicaciones mediante fertirriego por goteo es prerequisite que los fertilizantes seleccionados sean de alta y completa solubilidad en agua, cualidades que son afectadas por la temperatura y la concentración de

otros iones en solución. Las fuentes seleccionadas no deben diluirse a la solubilidad máxima, considerando que los cambios de temperatura pueden causar precipitación química y extensión del tiempo de mezcla (Evans y Waller, 2007).

Algunas consideraciones acerca de las fuentes de macroelementos recomendadas para el fertirriego que debe tenerse en cuenta al momento de realizar las mezclas en los tanques de fertilización:

- La urea y el nitrato de amonio son sales de alta solubilidad en agua; al momento de la mezcla en el tanque, la temperatura de la solución cae a 0 °C y por lo tanto se requiere más tiempo para la disolución completa. El nitrato de amonio tiene efecto corrosivo sobre el hierro galvanizado y el bronce.
- El nitrato de potasio es altamente soluble a temperaturas >20°C pero a temperaturas bajas puede precipitarse en el tanque de preparación de la solución nutritiva; es adecuado para aplicar con aguas salinas y tiene un costo mayor que otras fuentes de potasio. Es corrosivo para los metales en general.
- Las fuentes de P más comunes se combinan con sales de K o de amonio (NH_4^+).
- Los fertilizantes fosfatados son propensos a reacciones de precipitación con el Ca y el Mg que contiene el agua de riego, cuando la solución tiene un pH superior a 7 o cuando hay presencia de Fe soluble a un pH bajo. Los altos niveles de Ca en el agua pueden dar como resultado precipitaciones de yeso en las tuberías de riego y obturación de los goteros.
- El fosfato monoamónico (MAP) contiene N en forma amoniacal, es normalmente seguro para las partes metálicas, aunque corrosivo para el acero al carbono, al igual que el fosfato diamónico (DAP).
- El fosfato monopotásico (MKP) es una sal del hidróxido de potasio y del ácido fosfórico, soluble y no corrosiva. Se recomienda para cultivos en arenas y cuando se requiere un suministro diario de fósforo; debido a su residuo salino muy bajo, es muy adecuado para aguas salinas en agricultura de campo abierto.
- Como fuente de K se utiliza el cloruro de potasio estándar, KCl, una sal altamente soluble en agua y de bajo costo que se mezcla fácilmente con fertilizantes nitrogenados, aunque no se recomienda su mezcla con aguas salinas (Fares y Abbas, 2009). Es corrosivo para el bronce y el acero común.

- En contraste, el sulfato de potasio (K_2SO_4) es ampliamente empleado en condiciones salinas debido a la presencia de sulfato, SO_4^{2-} . Se usa donde el agua disponible es baja en Ca (agua blanda). Corroe el concreto y el acero común.

Otras fuentes de macroelementos son:

- La solución UAN (urea + NH_4NO_3) (32-0-0): de alta solubilidad en agua.
- La urea fosfato (UP), $CO(NH_2)_2 \cdot H_3PO_4$ (17.5-44-0): se aplica en condiciones de suelo neutras o alcalinas.
- El fosfato monopotásico acidulado, $KH_2PO_4 + H_3PO_4$ (0-60-20): se aplica cuando se emplea agua con altos contenidos de Ca (agua dura).
- El ácido fosfórico, H_3PO_4 (0-54-0): se emplea para limpiar las líneas de goteo de precipitados inorgánicos, destapar los goteros obstruidos y, al mismo tiempo, suministrar P a los cultivos.

Microelementos

Los elementos menores solo deben ser aplicados en caso de necesidad y siempre con la supervisión de un experto en fertilización, debido a que en exceso pueden ser tóxicos. Los suelos arenosos requieren, por lo general, cantidades más bajas de microelementos que los suelos arcillosos u orgánicos. Las fuentes más utilizadas y su tasa de aplicación, bien en solución o incorporadas al suelo, se presentan en el Cuadro 5.8.

Compatibilidad de las sales fertilizantes

El grado de compatibilidad de las sales nutritivas afecta la calidad de las disoluciones en el tanque de mezclas; por tal motivo, es importante conocer las relaciones de compatibilidad de las fuentes utilizadas, en especial en soluciones fertilizantes aplicadas junto con el riego por goteo.

La calidad del agua y su contenido de sólidos insolubles son aspectos clave en el balance de nutrientes, de manera que antes de realizar las mezclas de fertilizantes se recomienda verificar la compatibilidad de los compuestos, incluidos los que aporta el agua como disolvente, con el fin de prevenir la precipitación de ciertos elementos, como ocurre en las soluciones de pH alcalino que contienen calcio junto con fosfatos o sulfatos.

La compatibilidad se puede observar mezclando 50 mL de la solución fertilizante en 1 L de agua de riego. Si luego de dos horas se forma

► **CUADRO 5.8.** Fuentes de microelementos y sus tasas de aplicación en solución o incorporadas al suelo antes de la siembra.

Fuente	Suministro en solución (g/100 m ³)	Incorporación al suelo antes de la siembra (g/100 m ²)
Borax Na ₂ B ₄ O ₅ (OH) ₄ ·8H ₂ O (11% B)	30	140
Sulfato de cobre CuSO ₄ (25% Cu)	40	300
Quelato de cobre (9–13% Cu)	8	110
Sulfato de hierro FeSO ₄ (19–23% Fe)	1250	4500
Quelato de hierro (8–10% Fe)	160	1750
Sulfato de manganeso MnSO ₄ (27% Mn)	55	900
Quelato de manganeso (12% Mn)	40	450
Molibdato de sodio Na ₂ MoO ₄ (39% Mo)	2.5	3
Sulfato de zinc ZnSO ₄ (23% Zn)	2.5	450
Quelato de zinc (9–13% Zn)	6	200

precipitado o la solución se vuelve turbia, se debe evitar el uso de ese fertilizante en el sistema de riego (Roddy, 2008. Citado por Kafkafi y Tarchitzky, 2011). El Cuadro 5.9 es útil como tabla de referencia sobre la compatibilidad de las sales más utilizadas en los programas de fertilización de los cultivos; se identifican tres clases de relaciones entre ellas: sales compatibles, sales no compatibles y sales de compatibilidad reducida.

Caudal de inyección, Q_i

El caudal de inyección se refiere al caudal de solución fertilizante (solución madre) que se inyecta al agua de riego. Su valor depende del área del sector de riego, el tiempo de riego, la cantidad de sal fertilizante por aplicar y su concentración en la solución:

$$Q_i = \frac{A_s}{(0.8 * TR)} * \sum \left(\frac{N_{Fi}}{C_{ri}} \right) \quad (5.3)$$

donde,

Q_i es el caudal de inyección, en litros por hora (L/h),

A_s es el área del sector, en hectáreas (ha),

TR es el tiempo de riego, en horas (h),

N_{Fi} son las necesidades de fertilización, en kilogramos por hectárea (kg/ha) y

C_{ri} es la concentración del fertilizante en el agua de riego, en kilogramos por litro (kg/L).

El factor 0.8 resulta de considerar que la inyección de la solución fertilizante se realiza de tal manera que durante el primer 10% del tiempo de riego se permite el paso de agua limpia, durante el 80% siguiente se realiza la inyección de la solución fertilizante y en el 10% restante, de nuevo, se permite el paso de agua limpia, esto con el fin de remover residuos de fertilizantes retenidos en partes del sistema de riego. El subíndice i expresa que en la solución puede estar presente más de una sal fertilizante.

En relación con las unidades de medida:

$$\frac{\text{ha}}{\text{h}} * \frac{\frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{\frac{\text{kg}}{\text{L}}} = \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Concentración del fertilizante en el agua de riego, C_{ri}

Una vez se inyecta la solución fertilizante, la concentración de las sales aumenta en el agua de riego; su valor puede ser determinado por:

$$C_{ri} = 100 * \sum \left[\frac{N_{Fi}}{0.8 * d_g} \right] \quad (5.4)$$

donde,

C_{ri} es la concentración del fertilizante en el agua de riego, en partes por millón (ppm) y

d_g es la lámina de riego, en milímetros (mm).

Si,

$$1 \text{ mm} = \frac{10 \text{ m}^3}{\text{ha}}$$

entonces:

$$\frac{\frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{\frac{10 \text{ m}^3}{\text{ha}}} = \frac{\frac{1000 \text{ g}}{\text{ha}}}{\frac{10 \text{ m}^3}{\text{ha}}} = \frac{100 \text{ g}}{\text{m}^3} = 100 \text{ ppm} \quad (5.5)$$

Volumen del tanque de fertilización, V_T

La capacidad o volumen del tanque de fertilización depende del área del sector de riego, de las necesidades de fertilización y de la concentración de las sales en la solución fertilizante.

$$V_T = A_s * \sum \left(\frac{N_{Fi}}{C_{ri}} \right) \quad (5.6)$$

considerando,

$$\text{ha} * \frac{\frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{\frac{\text{kg}}{\text{L}}} = \text{L}$$

el volumen calculado se expresa en litros (L).

Ejemplo. Determinar el caudal de inyección, la concentración del fertilizante en solución, la conductividad eléctrica del agua de riego y el volumen del tanque de fertilización (Q_i , C_{ri} , CE y V_T) para un sector de 1 hectárea, $TR = 1$ h y $d_g = 12$ mm, de manera que la fertilización semanal durante 16 semanas sea equivalente a la aplicación única de 1000 kg/ha de un compuesto (10-30-10).

Seleccionar las sales fertilizantes

Cantidad de fertilización semanal:

$$\frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{16} = 62.5 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \text{ por aplicación}$$

Cantidades semanales de cada elemento según el compuesto por aplicar:

$$\text{N: } 62.5 * 0.1 = 6.25 \text{ kg/ha}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5: 62.5 * 0.3 = 18.75 \text{ kg/ha}$$

$$\text{K}_2\text{O: } 62.5 * 0.1 = 6.25 \text{ kg/ha}$$

Fuentes de nutrientes para cumplir con las necesidades semanales de fertilización:

6.25 kg/ha de N con 0.33 kg de urea

18.75 kg/ha de P_2O_5 con 39 kg de MAP

6.25 kg/ha de K_2O con 14.2 kg de KNO_3

Fuentes de N, P, K seleccionadas:

N: urea (46% N; 0% P_2O_5 ; 0% K_2O)

P_2O_5 : fosfato monoamónico, MAP (11% N; 48% P_2O_5 ; 0% K_2O)

K_2O : nitrato de potasio, KNO_3 (13% N; 0% P_2O_5 ; 44% K_2O)

Cantidades de N de cada fuente:

MAP: $18.75 \text{ kg } \text{P}_2\text{O}_5 / 0.48 = 39 \text{ kg de MAP que aportan}$

$$39 * 0.11 = 4.3 \text{ kg de N}$$

KNO_3 : $6.25 \text{ kg de } \text{K}_2\text{O} / 0.44 = 14.2 \text{ kg de } \text{KNO}_3 \text{ que suministran}$

$$14.2 * 0.13 = 1.8 \text{ kg de N}$$

- Los aportes de N de MAP y KNO₃ equivalen a 6.1 kg de N (4.3 kg de N + 1.8 kg de N)
- Para completar 6.25 kg de N requeridos cada semana faltarían 0.15 kg de N (6.25 kg de N – 6.1 kg de N).
- Si se utiliza urea para suplir este requerimiento, se necesitarían 0.33 kg de urea (0.15 kg de N / 0.46).
- De esta forma, para cumplir con las necesidades semanales de fertilización (6.25 kg de N, 18.75 kg de P₂O₅ y 6.25 de K₂O) se aplican:
 - 0.33 kg de urea
 - 39 kg de MAP
 - 14.2 kg de KNO₃

Calcular el caudal de inyección

De acuerdo con la Ecuación 5.3:

$\Sigma N_{Fi} = 0.33 \text{ kg de urea} + 39 \text{ kg de MAP} + 14.2 \text{ kg de KNO}_3 = 53.5 \text{ kg/ha}$ de fertilizantes

- La solubilidad en agua a 20 °C de cada compuesto es: urea = 105 kg/100 L, MAP = 40 kg/100 L y KNO₃ = 31 kg/100 L.
- Sin embargo, es conveniente usar concentraciones menores que las disoluciones indicadas con el fin de garantizar la total solución de las sales utilizadas. En este ejemplo, las concentraciones utilizadas son: urea = 1 kg/L, MAP = 0.225 kg/L y KNO₃ = 0.135 kg/L.

Así,

$$\sum \left(\frac{N_{Fi}}{C_{ri}} \right) = \frac{0.33 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \text{ de urea}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} + \frac{39 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \text{ de MAP}}{0.225 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} + \frac{14.2 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \text{ de KNO}_3}{0.135 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 278.8 \frac{\text{L}}{\text{ha}}$$

entonces

$$Q_i = \frac{1 \text{ ha}}{(0.8 * 1 \text{ h})} * \frac{278.8 \text{ L}}{\text{ha}} = 348.5 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Calcular la concentración del fertilizante en el agua de riego

De acuerdo con la Ecuación 5.4:

$$C_{ri} = \frac{100 * 53.5 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{(0.8 * 12 \text{ mm})} = 557.6 \text{ ppm}$$

$$C_{ri} = 100 * 53.5 \text{ kg/ha} / (0.8 * 12 \text{ mm}) = 557.6 \text{ ppm}$$

Determinar la conductividad eléctrica del agua de riego

$$CE = \frac{C_{ri}}{0.64}$$

$$CE = \frac{557.6 \text{ ppm}}{0.64} = 871.2 \frac{\mu\text{mhos}}{\text{cm}} = 0.87 \frac{\text{dS}}{\text{m}}$$

Calcular el volumen del tanque de fertilización

De acuerdo con la Ecuación 5.6:

$$V_t = 1 \text{ ha} * 278.8 \text{ L} / \text{ha} = 278.8 \text{ L}$$

El volumen calculado se aproxima a un tanque de 500 L.

Consideraciones finales

El fertirriego con riego por goteo es una alternativa de múltiples ventajas relativas en comparación con los sistemas de fertilización y riego utilizados comúnmente en el cultivo de la caña de azúcar. El mayor riesgo, sin embargo, es el taponamiento de los goteros, un problema manejable siempre que se utilicen fuentes de agua aptas o que puedan ser tratadas y productos fertilizantes compatibles y de alta solubilidad; además, las labores de limpieza y mantenimiento del sistema de riego deben ser frecuentes para prevenir obstrucciones y asegurar el flujo continuo de los goteros en los eventos de fertirrigación.

En el valle del río Cauca, en fincas del piedemonte cultivadas con caña de azúcar, se ha confirmado la viabilidad del fertirriego con caudal reducido y el fertirriego con riego por goteo como una tecnología promisoría en función de la productividad del cultivo y su rentabilidad. De acuerdo con las experiencias de investigación, adaptación y uso de los

sistemas de riego con caudal reducido y riego por goteo en la labor de fertirrigación, en suelos de alto contenido de grava y baja capacidad de almacenamiento de humedad se han conseguido aumentos en productividad hasta de 17 toneladas de caña por hectárea con un consumo de fertilizantes entre 28–38% menos con respecto a la fertilización líquida o sólida aplicada manualmente. En un análisis global de cinco cortes de la variedad CC 84–75 (Figura 5.3) se observó incremento y estabilización de las toneladas de caña y azúcar por hectárea y mes (TCHM y TAHM) frente a los históricos de la variedad Co 421 cultivada antes de la renovación del cultivo, lo cual es atribuible al cambio varietal, a los ajustes en la frecuencia de riego y a la aplicación de fertirriego (Campos y Cruz, 2017).



► **FIGURA 5.3.** Respuesta de la variedad CC 84–75 al fertirriego en el piedemonte del valle del río Cauca.

Fuente: Campos y Cruz, 2017.

La implementación de los nuevos sistemas de riego y fertirrigación han incluido el cambio varietal por renovación y la revisión de criterios de manejo agronómico en función de la operación del sistema de acuerdo con las condiciones agroecológicas propias de los sitios de cultivo. Por ejemplo, en cuanto a labores de cultivo, en lugar del aporque profundo convencional se realiza la labor de escarificación para conformar entresurcos de base más amplia a fin de conseguir mayor área de contacto entre el agua y el suelo; mientras que en la aplicación de los fertilizantes, las decisiones sobre frecuencia y fraccionamiento de las dosis recomendadas se basan en las curvas de absorción de nutrientes determinadas por Cenicaña para las variedades principales en el valle del río Cauca (Campos y Cruz, 2017).

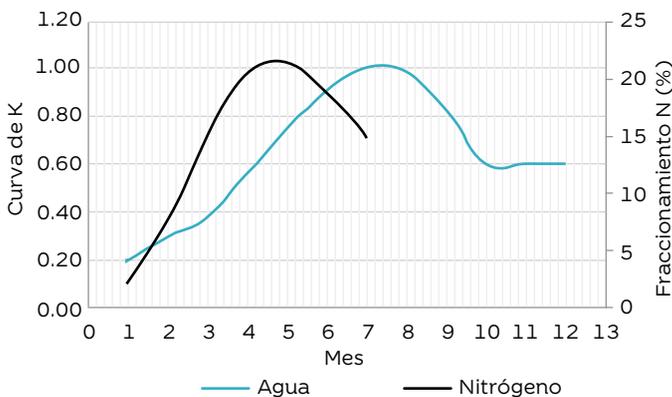
La eficiencia en la aplicación de los fertilizantes es la principal ventaja del fertirriego por goteo en comparación con otras formas de aplicación, lo cual se asocia con las siguientes ventajas específicas, propias del fertirriego por goteo:

- **Menores pérdidas de fertilizantes por volatilización** porque los nutrientes penetran el suelo disueltos en el agua de riego y, en particular, el fósforo y el potasio penetran el perfil a mayor profundidad que en la fertilización edáfica tradicional, cuando los nutrientes tienden a acumularse en la superficie del suelo (Martínez, 1998). Por ejemplo, en campos con fertirriego por goteo se han reportado mediciones de P hasta 50 cm de profundidad del suelo y de K hasta 60 cm (Fereris, 1981).
- **Mayor uniformidad de aplicación y mejor distribución de los nutrientes en la zona de raíces** porque el sistema de riego por goteo permite hacer aplicaciones localizadas y frecuentes (Martínez, 1998).
- **Oportunidad de la fertilización** porque es posible automatizar las aplicaciones y porque la alta frecuencia de aplicación permite suplir las necesidades del cultivo en sus diferentes etapas de desarrollo y hacer ajustes al plan de fraccionamiento y al programa de fertilización.
- **Mejoramiento de la productividad en suelos con altos contenidos de grava o muy arenosos, de baja capacidad de almacenamiento de humedad**, porque las condiciones de la fertirrigación por goteo, en pequeñas cantidades aplicadas de forma localizada y con alta frecuencia, humedecen la zona de raíces sin causar percolación profunda, lo cual favorece la absorción de nutrimentos y, en consecuencia, el crecimiento de las plantas, la productividad del cultivo.

Los suelos arenosos requieren mayor frecuencia de fertirrigación y, por lo general, cantidades más bajas de nutrientes que los suelos arcillosos u orgánicos.

- **Mayor estabilidad de la productividad del cultivo y mejoras en su rentabilidad** porque es posible mantener las cantidades indicadas de agua y nutrientes disponibles en la solución del suelo cuando la planta las requiere, sin incurrir en mayores costos de operación en las labores de riego y fertilización por la aplicación conjunta de los insumos.

De acuerdo con la experimentación y las evaluaciones realizadas por Cenicaña en asocio con los cultivadores de caña de azúcar del valle del río Cauca, se concluye que la práctica del fertirriego se fundamenta en las curvas de absorción de nutrientes y en el manejo del riego basado en las necesidades de agua del cultivo (Figura 5.4) en función de la variedad. Así mismo, que el éxito del fertirriego para asegurar alta productividad del cultivo depende del conocimiento de la calidad de agua en la fuente y de las características y condiciones del suelo, indispensables para definir las estrategias de mecanización, el diseño del sistema de riego y su operación, así como las decisiones de fertilización (fuentes, dosis, frecuencia de aplicación y fraccionamiento).



► FIGURA 5.4. Extracción de agua y nitrógeno en caña de azúcar.

Referencias

- Campos Rivera, A. y Cruz Bermúdez, D.M. (2017). *Informe de resultados: proyectos con deducción tributaria aprobados*. Cali. Cenicaña. Manuscrito sin publicar.
- Cenicaña (2018). Servicio de análisis de suelos y tejido foliar para recomendaciones de fertilización. Recuperado octubre 21, 2018, de <http://www.cenicana.org/web/servicios/analisis-de-suelos-y-tejido-foliar>
- Enciso, J., Porter, D., Bordovsky, J. y Fipps G. (2004). *Dándole mantenimiento a los sistemas de riego por goteo subsuperficiales*. Texas A&M. Recuperado noviembre 22, 2018, de <http://irrigationtoolbox.com/ReferenceDocuments/Extension/Texas/L5406S.pdf>
- Evans, R.G. y Waller, P.M. (2007). *Application of chemical materials*. Lamm, F.R., Ayars, J.E. y NaKayama, F.S. (eds.). *Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management*. Developments in Agricultural Engineering 13. (pp. 285–356). Italia: Elsevier.
- Fares, A. y Abbas, F. (2009). *Irrigation systems and nutrient sources for fertigation*. Department of Natural Resources and Environmental Management. United States: College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii at Manoa.
- Fereres, E. (1981). *Drip Irrigation Management*. Division of Agricultural Sciences. California, United States: University of California.
- Hillel, D. (2000). *Salinity Management for Sustainable Irrigation: Integrating Science, Environment, and Economic*. Washington D.C.: The World Bank.
- Kafkañi, U. y Tarchitzky, J. (2011). *Fertigation, A Tool for Efficient Fertilizer and Water Management*. Recuperado abril 25, 2018, de https://www.haifa-group.com/sites/default/files/ifa_fertigation-Kafkañi-511.pdf
- Marín, L.M. (2011). *Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en grava*. (Tesis). Recuperado abril 25, 2018, de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7908/1/CB-0450286.pdf>.
- Martínez, L. (1998). *Manual de fertirrigación*. Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), Gobierno Regional de Atacama, Comisión Nacional de Riego e Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile). Centro Regional de Investigación Intihuasi (La Serena).
- Medina San Juan, J.A. (1979). *Riego por goteo*. Teoría y práctica. Ediciones Mundi-prensa. Madrid.
- Muñoz A., F. (2016). *Conceptos básicos del suelo y su fertilidad para la nutrición de la caña de azúcar*. Cenicaña. Cali, Colombia. 20p. (Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar. Sistema de producción agrícola).

- Muñoz A., F. (2018). *Nutrición*. En: Serie Técnica, no.40. Características agronómicas y de productividad de la variedad Colombia (CC) 01-1940. pp. 31-40.
- Muñoz A., F. y López, M.A. (2016). *Nutrición*. En: Serie Técnica, no.39. Características agronómicas y de productividad de la variedad Cenicaña (CC) 93-4418. pp. 32-39.
- Nakayama, F.S., Boman, B.J. y Pitts, D.J. (2007). *Maintenance*. En : Lamm, F.R., Ayars, J.E. y Nakayama, F.S. (eds.). *Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management. Developments in Agricultural Engineering* 13.(pp 389-430).
- Netafim (2011). *Guías para el mantenimiento de sistemas de riego*. Recuperado noviembre 25, 2018 de http://www.netafim.fr/data/uploads/120430%20preventive%20maintenance%20guide%20spanish_1.pdf
- Pierzynski, G.M., Sims, J.T. y Vance, G.F. (1994). *Soils and environmental quality*. Boca Raton, FL: Lewis Publi.
- Reed, W.M (Ed). (1996). *Agua, sustratos y nutrición*. Batavia, Illinois. Ball Publishing.
- Rogers, D.H., Lamm, F.R. y Alam, M. (2003). *Subsurface drip irrigation systems water quality assesment guidelines*. Kansas State University. Recuperado abril 25, 2018, de <https://www.ksre.k-state.edu/sdi/reports/2003/mf2575.pdf>
- Steduto P., Hsiao, T.C., Fereres, E. y Raes D. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Estudio FAO riego y drenaje 66. Recuperado abril 25, 2018, de <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>
- US EPA. (1973). *Water quality criteria 1972*. PB-236 199/6BE. National Academy of Sciences – National Academy of Engineers. US Environmental Protection Agency, Washinton, DC.

Símbolos y abreviaturas

pe	Peso equivalente	RN	Requerimientos de nutrientes del cultivo para una producción determinada
CE	Conductividad eléctrica	S	Aporte de nutrientes por el suelo la eficiencia de la fertilización.
C_{ri}	Concentración del fertilizante en el agua de riego	STD	Sólidos totales disueltos
E_F	Eficiencia de la fertilización	TAA	Tasa de acumulación del nutrientes
N_F	Necesidades de fertilización	TR	Tiempo de riego
P_w	Porcentaje de suelo humedecido		
Q_i	Caudal de inyección		



Confía en 4-72,
el servicio de envíos
de Colombia

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional

.....
www.4-72.com.co

El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, Cenicaña, es una institución privada, sin ánimo de lucro, que se financia con aportes directos de trece ingenios azucareros del valle del río Cauca y sus proveedores de caña. Los pilares de su gestión son: azúcar, energía, sostenibilidad y diversificación. A través de la investigación y la prestación de servicios especializados, el Centro apoya la gestión de conocimiento y la innovación tecnológica en la agroindustria colombiana. Fundado en 1977 por iniciativa de la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, Asocaña.

Misión

Contribuir al desarrollo, la competitividad y la sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, mediante la generación de conocimiento y la innovación tecnológica, a través de la investigación, la transferencia de tecnología y la prestación de servicios especializados, con base en un sistema integrado de gestión, para que el sector sea reconocido por el mejoramiento socioeconómico y la conservación ambiental de las zonas productoras de caña de azúcar. Cenicaña. 2018.

Visión

Ser un Centro de excelencia en investigación e innovación a nivel mundial, generador de tecnologías que hagan competitivo el sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, reconocido por los donantes como una inversión rentable, por su personal como un sitio ideal para trabajar y desarrollarse, por la comunidad científica como un centro creativo y de calidad; y por la sociedad, como una entidad valiosa.

Cenicaña. 2018.

RIEGO POR GOTEÓ

EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

En los últimos años la agroindustria colombiana de la caña de azúcar ha mostrado una evolución en el afinamiento de las prácticas agrícolas. Esto se ha logrado mediante el uso de sensores de humedad y remotos, así como el establecimiento de sistemas de riego más eficientes, como el pivote central, el desplazamiento lateral y el goteo, este último con un ritmo acelerado de adopción.

Estos desarrollos apuntan a refinar las prácticas de campo, dentro del enfoque de agricultura específica por sitio (AEPS), tal como ha sucedido con la fertilización en tasa variada y su fraccionamiento de acuerdo con la edad del cultivo, posibles con los nuevos sistemas de riego.

Con el riego por goteo se permite la aplicación controlada de agua y fertilizantes en solución (fertirriego) según las necesidades y estado de desarrollo del cultivo, lo que ha conducido a aumentar la productividad de la caña de azúcar en los diferentes ambientes del valle del río Cauca y a una disminución de los insumos; sin embargo, el sostenimiento de estos resultados dependerá del conocimiento acerca de los componentes del sistema, su funcionamiento, condiciones, ventajas y limitaciones.

Cenicaña entrega este libro a cultivadores, ingenieros, técnicos y a la comunidad académica para contribuir al conocimiento, aprendizaje y uso eficiente del sistema de riego por goteo en la agroindustria colombiana de la caña de azúcar.



cenicaña

Centro de Investigación de la
Caña de Azúcar de Colombia

www.cenicana.org

Remite/Cenicaña. Calle 58N No. 3BN-110 Cali, Colombia



ISBN: 978-958-8449-21-0



9 789588 449210

Tarifa Postal Reducida Servicios Postales Nacional S.A.
No. 2019-700. 4-72, vence 31 de dic. 2019.