

Drenajes

Ricardo Cruz V.*

Introducción

El drenaje agrícola se define como la evacuación del exceso de agua en el suelo. En el cultivo de la caña de azúcar, el drenaje es tan importante como el riego, ya que en forma conjunta mantienen en el suelo un ambiente propicio para obtener producciones óptimas de caña y azúcar. El exceso de humedad produce una reducción en el contenido de oxígeno en el suelo que disminuye la tasa de respiración de las raíces de la planta, la mineralización del nitrógeno, la absorción de agua y nutrientes, y propicia la formación de sustancias tóxicas. Si la planta de caña crece en estas condiciones durante un tiempo prolongado, especialmente durante el período de rápido crecimiento, se produce un retardo en su desarrollo vegetativo y, por ende, una disminución en la producción. Experimentos realizados en CENICAÑA muestran que la producción se puede reducir hasta en 35 t/ha, cuando el nivel freático se mantiene a una profundidad menor de 70 cm (CENICAÑA, 1991). Si la humedad excesiva ocurre durante las etapas de adecuación del terreno, la preparación y la siembra o la cosecha, estas labores sufren retraso ya que los suelos se compactan y el porcentaje de germinación se reduce, aumentando los costos por concepto de resiembras y, por consiguiente, los costos totales de producción.

En Colombia, la caña para producción de azúcar es un cultivo permanente que abarca 185,000 ha del valle geográfico del río Cauca con topografía plana y suelos, en su mayoría, con alta capacidad de retención de agua. En la región, las lluvias son abundantes de abril a mayo y de octubre a noviembre, siendo necesario aplicar riego durante el resto del año; la mecanización es intensiva, tanto para las labores de preparación y cultivo como para el manejo y transporte de la caña cosechada. Estas condiciones implican un alto riesgo de evacuación lenta del agua y de niveles freáticos altos que deben ser manejados mediante técnicas de drenaje.

En el valle geográfico del río Cauca, aproximadamente 15,000 ha cuentan con drenajes entubados, instalados entre 1.8 y 2.0 m de profundidad y distanciados entre 80 y 120 m. Sin embargo, en muchas ocasiones estos drenajes no han sido efectivos, debido a los estratos impermeables que se encuentran por encima de esta profundidad o a la baja conductividad hidráulica de los suelos. En otros casos, los campos han sido sobredrenados según el criterio erróneo de bajar el nivel freático hasta 1.5-1.8 m, produciendo grandes pérdidas de agua por percolación con el consiguiente incremento en los requerimientos de riego.

* Ricardo Cruz es Ingeniero Agrícola, MSc. en manejo de aguas, CENICAÑA, Apartado Aéreo 9138, Cali.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se presentan aquí varias metodologías para el reconocimiento, diagnóstico y solución de problemas de drenaje, basados en la experimentación realizada por CENICANA y los ingenios azucareros de la región.

Reconocimiento y Diagnóstico

El reconocimiento y diagnóstico de los problemas de drenaje agrícola comprende los estudios básicos sobre suelos, precipitación y aguas superficiales y subterráneas. Estos estudios incluyen la recolección de la información disponible sobre fotografías aéreas; mapas de suelos y planos topográficos; y datos de hidrología, clima, cultivos y producción de caña y azúcar.

En esta fase se deben determinar la extensión del área con problemas de drenaje y las causas de los excesos de agua, cuantificar las entradas y salidas de agua, la frecuencia y duración de las recargas y determinar la profundidad del nivel freático y su relación con la precipitación y los niveles de aguas superficiales cercanas. Además, es importante hacer observaciones en las áreas próximas al lote, ya que una recarga desde cuerpos de agua situados en las partes más altas, o un obstáculo localizado en la descarga aguas abajo, pueden causar problemas en el drenaje.

A nivel semidetallado, se recomienda que los planos topográficos tengan una escala 1:25,000; 1:10,000 ó menores, dependiendo del área, con curvas a nivel cada 25 cm y toma detallada de los niveles de fondo y de agua en canales, zanjas y otras estructuras. A nivel detallado, el proyecto incluye cálculos, costos y planos a escalas 1:10,000 a 1:2500 ó menores, según el caso.

Análisis de la Precipitación

El análisis de las lluvias en drenaje agrícola tiene como objetivo determinar la “lluvia de diseño”, con el fin de calcular la cantidad de agua que se debe evacuar. Para el efecto, se requiere información sobre las precipitaciones diarias a través de varios años, que permitan realizar un análisis de frecuencias y, con base en él, seleccionar lluvias con períodos de retorno de 5 años para drenaje superficial y de 1 año para drenaje subterráneo.

En el valle geográfico del río Cauca, la distribución de la precipitación, que ocurre entre abril y mayo y entre octubre y noviembre, es una de las causas más comunes de los excesos de agua en el suelo; por lo tanto, se recomienda realizar el análisis de frecuencias de lluvia máxima para estas épocas.

Frecuencia de precipitación

El análisis de las frecuencias de precipitación permite seleccionar la lluvia de diseño, utilizando uno de los métodos siguientes:

Drenajes

1. Frecuencias basadas en intervalos de láminas (grupos de lluvias). Se usa cuando se dispone de muchos datos. Para este análisis se debe proceder de la manera siguiente:
 - a. obtenga la información de lluvia diaria (en mm) para los meses más críticos durante cada año;
 - b. seleccione un intervalo apropiado de cantidad de lluvia, por ejemplo, cada 20 mm (0-20; 20-40 mm...) y determine los parámetros que se presentan en la Tabla 1;
 - c. cuente el número de observaciones en cada intervalo (m_i);
 - d. calcule la frecuencia (F) de ocurrencia de cada intervalo, así:

$$F_i (a_i < P \leq b_i) = \frac{m_i}{N}$$

donde:

a_i = límite inferior del intervalo
 b_i = límite superior del intervalo
 P = probabilidad de ocurrencia
 N = número total de datos de lluvia.

- e. calcule la frecuencia de excedencia $F (P > a_i)$ sobre un límite inferior (a_i) dentro de cada intervalo "i", contando el número " M_i " de todas las lluvias que exceden " a_i ":

$$F (P > a_i) = \frac{M_i}{N}$$

- f. calcule la frecuencia de no excedencia o frecuencia acumulada:

$$F (P \leq a_i) = 1 - F (P > a_i)$$

- g. calcule el período de retorno (T) para cada límite inferior de lluvia (a_i) como el inverso de la frecuencia de excedencia:

$$T a_i = \frac{1}{F(P > a_i)}$$

2. Frecuencias basadas en un ordenamiento de láminas en forma decreciente (se usa cuando se tienen pocos datos). El procedimiento se describe a continuación:

- a. tabule, en orden decreciente, los datos de lluvia mensual y multianual (Tabla 2) o de lluvia máxima diaria multianual para el mes más crítico (Tabla 3), asignando un número de rango a cada valor (r);
- b. calcule la frecuencia de excedencia:

$$F(P > P_r) = \frac{r}{N+1}$$

c. calcule la frecuencia de no excedencia:

$$F(P \leq Pr) = 1 - F(P > Pr) = 1 - \frac{r}{N+1}$$

d. calcule el período de retorno (T) para cada lluvia:

$$T = \frac{1}{F(P > Pr)}$$

Tabla 1. **Análisis de frecuencia con base en los intervalos de lámina de lluvia diaria.**

Intervalo de lluvia (mm)		Observaciones (no.)	Frecuencia F(ai < P < bi)	Frecuencia de excedencia	Frecuencia acumulada	Período de retorno	
Inferior (ai)	Superior (bi)	ai < P < bi (mi)	(mi/N)	F(P > ai) (Mi/N)	F(P < ai) 1-F(P > ai)	Tai (días) = 1/(5)	Tai (años) = (7)/30
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)

Tabla 2. **Distribución de frecuencia con base en el ordenamiento de láminas de lluvia mensual multianual.**

Número de rango	Lluvia mensual decreciente		Año	F(P > Pr)	F(P < Pr)	T (años)
r	Pr	Pr		r/(n + 1)	1-F(P > Pr)	1/(5)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)

Drenajes

Tabla 3. **Distribución de frecuencia con base en el ordenamiento de láminas máximas de lluvia para 1 día por mes.**

Número de orden	Lluvia decreciente		Año	$F(P > Pr)$	$F(P < Pr)$	T (años)
r	Pr	P^2r		$r/(n + 1)$	$1 - F(P > Pr)$	1/5
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)

Se recomienda trabajar con distribuciones de frecuencias basadas en un ordenamiento decreciente de láminas de lluvia máxima de 1 día de duración por mes crítico, pero cuando no existen datos diarios se puede trabajar con láminas de lluvia mensuales.

Una vez que se ha realizado el análisis de lluvias, se selecciona la lluvia de diseño. Para drenaje superficial se escoge la lluvia correspondiente a un período de retorno de 5 años, y para drenaje subterráneo la precipitación máxima diaria con un período de retorno de 1 año.

Estudios Hidropedológicos

Para el estudio de la hidrología del suelo con fines de drenaje, se deben tener a disposición los mapas de clasificación de suelos con su respectiva descripción. A continuación se recolectan los datos hidrológicos y físicos hasta una profundidad de 4 m en el perfil del suelo.

Los estudios hidropedológicos se realizan con el objeto de conocer:

1. El área de ocurrencia de los excesos de agua y sus posibles causas, tanto a nivel superficial como subterráneo.
2. Las consecuencias económicas de los excesos de agua sobre las labores de preparación, siembra, cultivo, cosecha y la producción final.
3. Las áreas con condiciones desfavorables de suelo como salinidad, baja infiltración, compactación, baja conductividad hidráulica, etc.
4. Las propiedades del suelo que afectan el drenaje.
5. La topografía, la fisiografía y las facilidades para la evacuación del agua.

Para estos estudios es necesario disponer de la información siguiente:

1. descripción de los perfiles representativos que especifiquen para cada estrato: espesor, textura, estructura, color y moteado, presencia de carbonatos, estado de humedad, consistencia, porosidad, densidad de raíces y presencia de capas impermeables;
2. mapa de la textura del suelo entre 2 y 4 m de profundidad;
3. mapa de cotas de la parte superior del hidroapoyo o estrato de baja permeabilidad en el cual se apoya un acuífero libre;
4. mapa sobre localización, extensión y espesor de capas de arena gruesa o grava, ubicadas por encima o por debajo de la profundidad normal a la cual se instalarán los drenes;
5. mapa de salinidad de suelos;
6. mapas de isobatas e isohypsas. Las primeras son líneas que unen puntos de igual profundidad de nivel freático. Las isohypsas son líneas que unen puntos de igual cota de nivel freático;
7. mapa de fluctuación de la tabla de agua con base en las características hidromórficas del suelo, fenómeno gley o capas de color gris azulado que se presentan cuando el suelo se ha mantenido bajo el nivel freático durante un largo período de tiempo; y
8. mapa de conductividad hidráulica para capas por encima y por debajo de la profundidad de los drenes.

Medición de la Profundidad del Nivel Freático (Freatimetría)

El nivel freático (NF) lo constituye el nivel superior de las aguas subterráneas libres que tiene una presión igual a la presión atmosférica.

Para un tratamiento adecuado de problemas de drenaje subterráneo es necesario conocer la profundidad del nivel freático en el espacio y en el tiempo. Este conocimiento se puede lograr mediante lecturas periódicas de los niveles de agua en pozos de observación o baterías piezométricas. Un pozo de observación (Figura 1) puede ser un hoyo hasta una profundidad de importancia agronómica, entre 1.8 y 2.0 m; sin embargo, para asegurar las lecturas durante un largo período de tiempo y evitar la influencia directa de las lluvias o de la escorrentía sobre el nivel del agua en el pozo, se acostumbra instalar un tubo perforado de PVC o una manguera rígida de polietileno de 25 a 50 mm de diámetro, que se recubren con una malla obtenida a partir de los empaques sintéticos de fertilizantes comerciales.

Para conocer la situación del nivel freático en una zona, se requiere información de varios puntos, para lo cual se debe instalar una red de pozos de observación que cubra el área en estudio. La distribución de estos pozos se puede

Drenajes

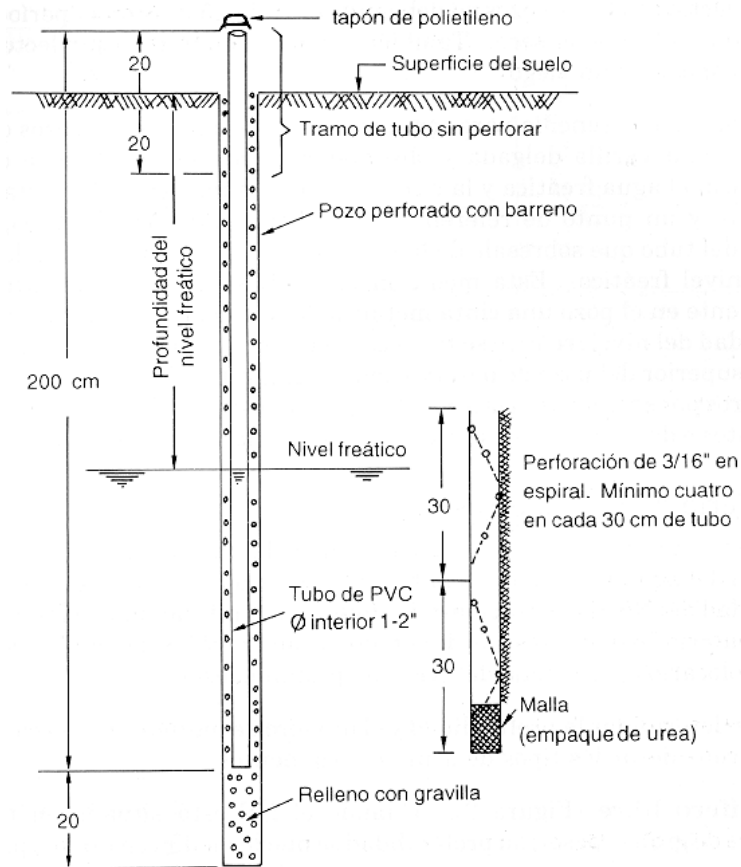


Figura 1. Diagrama de un pozo para observación del nivel freático.

hacer en forma sistemática en cuadrícula o rectángulo, o por concentración de puntos de acuerdo con las áreas críticas, colocándolos en sitios de fácil acceso y evitando que queden cercanos a canales, drenes, ríos, pozos de bombeo y caminos o vías de tránsito, para prevenir su destrucción u obturación.

El número de pozos de observación depende de los fines y de la precisión deseada. Como guía se puede tomar la siguiente:

Area (ha)	No. de pozos de observación
100	20
1,000	40
10,000	100

Las lecturas en los pozos se deben hacer cada 15 días en el período lluvioso y cada 30 en el período seco. También se recomienda efectuar lecturas de los niveles después de un riego.

La forma más sencilla para conocer el nivel de agua en los pozos consiste en introducir una varilla delgada y observar el límite entre la parte de ésta en contacto con el agua freática y la parte que no se humedeció. La distancia entre este límite y un punto de referencia en el borde superior del tubo, menos la longitud del tubo que sobresale de la superficie del suelo, determina la profundidad del nivel freático. Esta medición también se puede hacer introduciendo directamente en el pozo una cinta metálica de flexómetro. En todos los casos, la profundidad del nivel freático se toma con referencia a la superficie del suelo y no al borde superior del pozo de observación el cual, generalmente, sobresale varios centímetros por encima de la misma. Cuando se sospecha de la existencia de flujos ascendentes o de percolación, se recomienda instalar una batería de piezómetros.

Batería de piezómetros

Es un conjunto de tubos de 12 a 15 mm de diámetro que se usan para medir la presión del agua en un punto dentro del suelo y a partir de la cual se calcula la profundidad del NF. La selección del número y la profundidad de los piezómetros en cada batería se hace de acuerdo con las características del perfil del suelo. Se sugiere colocarlos por debajo del NF más profundo esperado.

Para determinar la profundidad y el número de piezómetros en cada batería, se deben considerar los tipos de acuíferos siguientes:

Acuífero libre (Figura 2). Cuando el NF está situado en un estrato permeable de gran espesor, su profundidad se puede medir con un solo piezómetro.

Acuífero semiconfinado (Figura 3). Cuando el NF está en un estrato semipermeable sobre un estrato permeable, es necesario instalar un piezómetro dentro de la capa permeable y dos más en el estrato confinante superior semipermeable.

Acuífero libre sobre acuífero semiconfinado (Figura 4). En este caso, se recomienda colocar dos piezómetros en el estrato permeable inferior confinado y un número igual en el estrato permeable superior.

La determinación del nivel freático por medio de una batería de piezómetros situada en un mismo estrato de suelo, se obtiene graficando la profundidad del piezómetro contra la presión observada y prolongando la línea de regresión hasta la presión igual a cero (Figura 5).

Hidrograma de Nivel Freático

Es un gráfico en el que se relaciona la profundidad del NF con el tiempo (Figura 6). En él se muestran las tasas de ascenso y descenso y los períodos críticos del NF en relación con el tiempo. En combinación con otros factores de balance

Drenajes

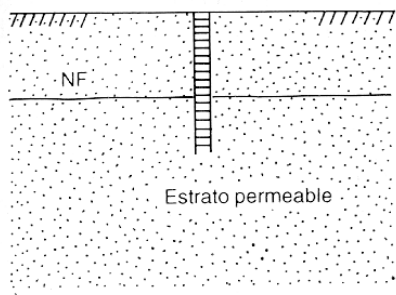


Figura 2. *Diagrama de un acuífero libre.*

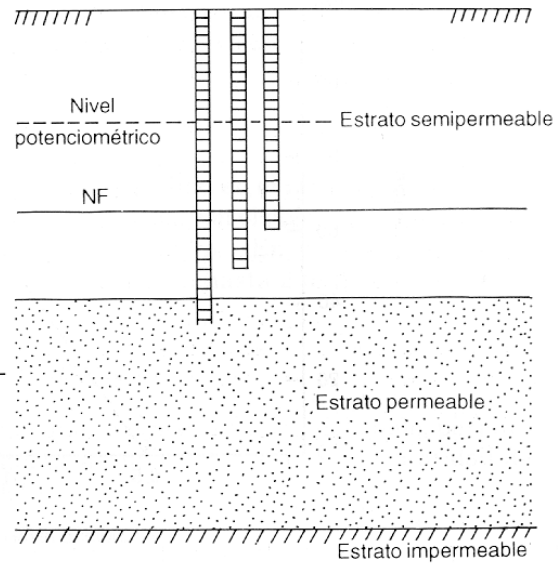


Figura 3. *Diagrama de un acuífero semiconfinado.*

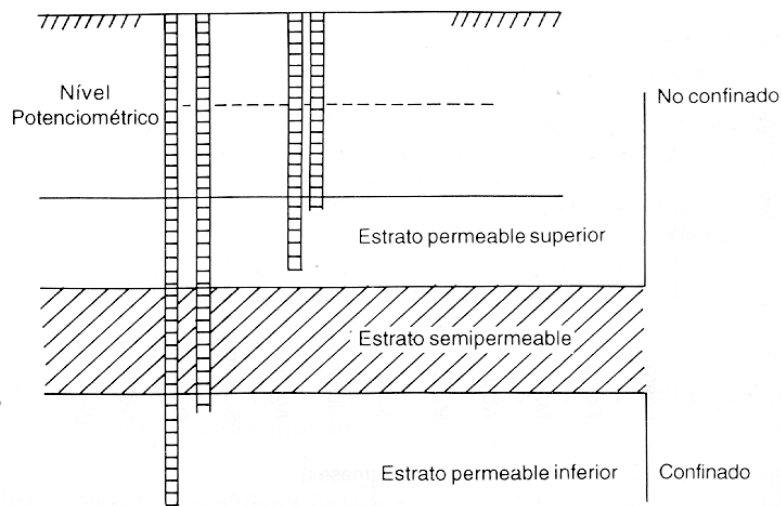


Figura 4. *Acuífero libre sobre acuífero semiconfinado.*

hidrológico (precipitación, riegos, bombeo de pozos, etc.) se puede utilizar para determinar las causas de las fluctuaciones en el NF.

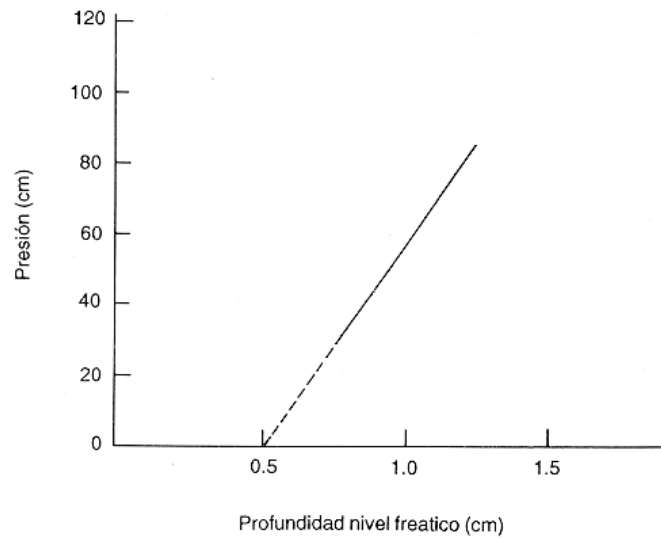


Figura 5. *Determinación de la profundidad del nivel freático utilizando batería de piezómetros en el mismo estrato.*

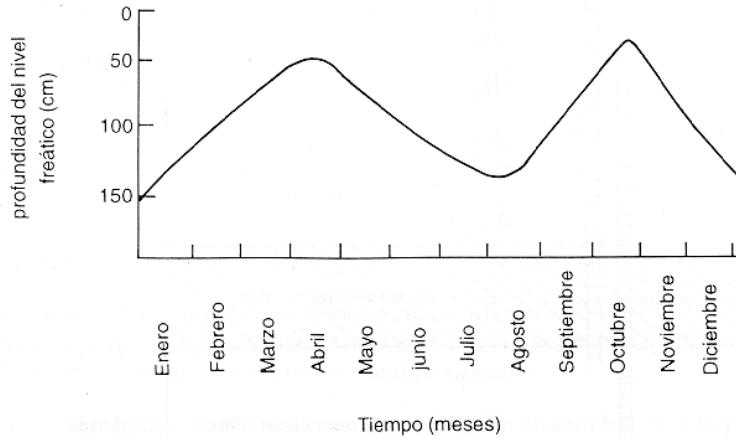


Figura 6. *Hidrograma de niveles freáticos en el valle geográfico del río Cauca, Colombia.*

Mapas de Agua Subterránea

Isohypsas

Son líneas que unen puntos de igual cota de nivel freático. Se puede trabajar con el promedio de isohypsas para un período largo, siendo suficientes dos planos

Drenajes

en el período lluvioso y uno en el período seco. A partir de estas líneas se puede determinar la dirección del flujo de agua subterránea, ya que éste es perpendicular a las líneas isohypsas.

Isobatas

Son líneas que unen puntos de igual profundidad en el nivel freático. Estos planos se elaboran para fechas de alta precipitación, con el objeto de delimitar las áreas críticas donde el NF puede afectar el cultivo. En caña de azúcar se recomienda levantar las curvas isobatas cada 25 cm hasta 2 m de profundidad.

Balance de Agua Subterránea

El balance de entrada y salida de agua que ocurre en el perfil del suelo, permite determinar las causas de un problema de drenaje subterráneo y la cantidad de agua que se debe evacuar a través del sistema de drenaje.

La ecuación de balance de agua en la zona no saturada es:

$$P + R - E - ET - \text{Perc.} + \text{Cap.} = \Delta S$$

donde:

- P = precipitación (mm)
- R = riego (mm)
- E = escorrentía superficial (mm)
- ET = evapotranspiración (mm)
- Perc. = percolación (mm) (agua que pasa de la zona no saturada del suelo hacia el nivel freático)
- Cap. = capilaridad (mm) (agua ascendente desde el nivel freático hacia la zona no saturada del suelo)
- ΔS = cambio en el contenido de agua del suelo (mm) en un período de tiempo determinado.

Percolación y ascenso capilar

Estos dos fenómenos no suceden en forma simultánea. La percolación normalmente ocurre durante la aplicación de riego y posteriormente por 2 a 5 días. El ascenso capilar se puede presentar durante el tiempo restante hasta la siguiente aplicación de riego. Las determinaciones de la percolación y la capilaridad dependen de las condiciones siguientes:

1. Durante el período lluvioso, la precipitación excede a la ET y el suelo permanece en capacidad de campo (CC) durante buena parte del tiempo, o

sea, que no hay cambio en el contenido de humedad del suelo ($\Delta S = 0$) y, por lo tanto, el ascenso capilar y la escorrentía son iguales a cero; en consecuencia:

$$\text{Percolación} = P - ET$$

2. Al principio de la estación lluviosa, el suelo aún no está en capacidad de campo, no ocurre percolación (Perc. = 0) y el ascenso capilar es muy pequeño (Cap. = 0), por tanto:

$$P - ET = \Delta S$$

3. Durante un período lluvioso corto, el suelo alcanza su capacidad de campo, la evapotranspiración es mínima, lo mismo que la escorrentía y el ascenso capilar, o sea:

$$\text{Perc.} = P$$

4. Durante el tiempo de riego se presentan pérdidas por percolación que se pueden estimar a partir de la evaluación hidráulica.

En cultivos de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, la situación más frecuente es la primera.

Conductividad Hidráulica (K)

La conductividad hidráulica (K) es un índice de permeabilidad que muestra la capacidad de movimiento de agua a través de los poros del suelo. Es un factor importante en el diseño de sistemas de drenaje y su medición se puede hacer por varios métodos de campo o de laboratorio. Si la tabla de agua o nivel freático se encuentra a poca profundidad (< 1 m), generalmente se usan métodos de bombeo dentro de un agujero. La conductividad hidráulica, con frecuencia, varía en forma amplia de un punto a otro en el campo, por lo cual se requieren varias mediciones para obtener valores representativos.

Los suelos arcillosos pueden presentar valores de conductividad hidráulica desde 0.01 hasta 30 m/día y los arenosos desde 0.1 m/día en adelante.

La conductividad hidráulica puede variar desde muy lenta hasta muy rápida, de acuerdo con los valores que aparecen en la Tabla 4. Una vez determinados estos valores, se deben representar sobre un plano y dibujar las líneas de igual conductividad.

Requerimientos de Drenaje

Los requerimientos o coeficientes de drenaje pueden ser para drenajes superficial o subterráneo.

Drenajes

Tabla 4. **Clasificación de la conductividad hidráulica (K).**

Clasificación	Rango de conductividad hidráulica (K) (m/día)
Muy lenta	< 0.03
Lenta	0.03 a 0.12
Moderadamente lenta	0.12 0.50
Moderada	0.50 1.50
Moderadamente rápida	1.50 3.00
Rápida	3.00 4.50
Muy rápida	> 4.50

Requerimiento para drenaje superficial

El drenaje superficial es equivalente al exceso de agua de escorrentía que se debe remover por unidad de tiempo. Se puede expresar mediante la ecuación siguiente:

$$Cd = \frac{E}{T_d}$$

donde:

Cd = coeficiente de drenaje superficial (lt/seg/ha)

E = escorrentía total expresada en términos de lámina (mm)

T_d = tiempo de drenaje, en horas. Es el tiempo que el cultivo de caña de azúcar puede soportar bajo inundación sin disminuir su producción en forma significativa y varía entre 2 y 4 días, así: $T_d = 2$ días para plantaciones hasta de 2 meses y $T_d = 4$ a 7 días para plantaciones de 4 meses o más.

El coeficiente de drenaje superficial (Cd) se puede también expresar como caudal por unidad de área:

$$Cd = \frac{2.78 E}{T_d} \quad \frac{(\text{lt/s})}{(\text{ha})}$$

Escorrentía total (E). Se puede determinar mediante el balance hídrico, de acuerdo con la relación siguiente:

$$E = P - I - ET$$

donde:

- E = escorrentía total
- P = lluvia de diseño obtenida por medio del análisis de frecuencias para un período de retorno de 5 años y una duración equivalente al tiempo de drenaje (t_d)
- I = infiltración total durante el tiempo de drenaje
- ET = evapotranspiración durante el mismo período de tiempo.

Requerimiento de drenaje subterráneo

En el drenaje subterráneo se deben tener en cuenta: (1) la profundidad mínima a la cual se debe ubicar el NF para que no cause disminución en la producción de caña, y (2) la cantidad de agua por unidad de tiempo que se debe evacuar mediante este sistema.

Cuando el nivel freático permanece a una misma profundidad o varía poco durante períodos de tiempo relativamente largos, debido principalmente a la precipitación, el sistema de drenaje se debe diseñar aplicando el modelo de flujo permanente.

En los casos cuando el nivel freático se eleva en forma brusca por efecto de una lluvia o riego, pero luego desciende, se aplica otro criterio de drenaje definido por la profundidad hasta la cual se debe abatir dicho nivel en un período de tiempo determinado. Este modelo se denomina flujo no permanente.

De acuerdo con las investigaciones conjuntas de CENICANÑA y los ingenios azucareros, es posible concluir que un nivel freático entre 1.0 y 1.2 m de profundidad es adecuado para el desarrollo y producción del cultivo de la caña de azúcar (CENICANÑA, 1992). En otras palabras, si es necesario instalar drenaje para abatir el nivel freático, la profundidad de abatimiento debe ser de 1.0 m para obtener un aporte de agua por capilaridad y disminuir, de esta manera, los requerimientos de riego, siempre y cuando la calidad del agua subterránea sea buena.

Para el modelo de flujo permanente, la cantidad de agua por unidad de tiempo que se debe descargar por medio del drenaje subterráneo, es igual a la percolación profunda calculada mediante el balance de agua en el suelo, que para el valle geográfico del río Cauca en época lluviosa, se puede expresar como:

$$\text{Perc.} = P - ET$$

donde:

- Perc. = percolación profunda
- P = precipitación máxima diaria con período de retorno de 1 año
- ET = evapotranspiración

Métodos de Drenaje

Una vez identificado el problema de drenaje mediante los estudios básicos de reconocimiento y diagnóstico, se selecciona el método o sistema de drenaje, que puede ser superficial o subterráneo (interno).

Un sistema de drenaje consta de drenes laterales, colectores y principales. Los laterales, denominados también drenes parcelarios, mantienen el nivel freático a la profundidad deseada y recogen el agua de escorrentía para conducirla hasta los colectores que, a su vez, la conducen hasta los drenes principales que la evacúan fuera del área.

Drenaje superficial

El drenaje superficial consiste en la remoción del agua acumulada sobre la superficie del terreno a causa de lluvias intensas y frecuentes, desbordamiento de cauces, topografía plana e irregular y suelos con baja capacidad de infiltración. Dependiendo del origen de los excesos de agua, para su control se puede escoger una o varias de las formas de drenaje superficial siguientes:

Para controlar las inundaciones. Se recomienda la construcción de diques paralelos a los cauces para evitar su desbordamiento.

Para controlar las aguas de escorrentía. Da buen resultado la construcción de canales interceptores o diques perimetrales para regular el agua proveniente de áreas adyacentes.

Red de drenaje superficial local. Consta de canales principales, secundarios y colectores, que se construyen dentro del área problema y tienen capacidad para remover el agua superficial en un lapso de 4 a 7 días.

También es posible facilitar el drenaje de los lotes mediante la nivelación, con el objeto de conformar una pendiente uniforme.

Drenaje subterráneo

En caña de azúcar, el drenaje subterráneo es necesario cuando las áreas presentan niveles freáticos permanentes a profundidades menores de 1.0 m durante la etapa de rápido crecimiento del cultivo (después de 4 meses de edad). Sin embargo, el sistema de drenaje que se instale no debe producir el abatimiento del nivel freático a más de 1.20 m, con el fin de aprovechar el aporte de agua por capilaridad que permite reducir en forma significativa los requerimientos de riego. Esto explica el por qué se recomienda utilizar el concepto de manejo del nivel freático conjuntamente con el riego. Lo anterior se cumple cuando las aguas freáticas son de buena calidad; en caso contrario, para evitar riesgos de salinización, el nivel freático se debe abatir, al menos, hasta 1.50 ó 1.80 m de profundidad en el suelo.

Los métodos de drenaje interno utilizados para abatir el nivel freático directamente en las parcelas, se clasifican en: (1) drenes abiertos o zanjas, (2) drenes topo o conductos cerrados no revestidos, y (3) drenes entubados con PVC, arcilla o cemento.

Drenes abiertos. Son canales abiertos y profundos con alta capacidad que se pueden utilizar para conducir aguas subterráneas o de escorrentía. Requieren una pendiente entre 0.015% y 0.4%, o sea, menor que la de los drenes enterrados que tienen entre 0.1% y 1.0%.

Los drenes abiertos tienen algunas desventajas, ya que ocupan un área que podría aprovecharse para cultivo; los taludes son susceptibles a la erosión; por lo tanto, requieren obras de protección que son costosas y su mantenimiento debe ser estricto para evitar la invasión de malezas o el exceso de sedimentos que les restan capacidad de evacuación.

En áreas planas normalmente es preferible usar tubos como drenes laterales y zanjas como colectores, mientras que en áreas con pendiente los laterales y los colectores se pueden construir con tubería enterrada para incrementar el área efectiva de cultivo.

En caña de azúcar, el espaciamiento entre los colectores puede variar entre 300 y 500 m y se determina de acuerdo con el tamaño de la parcela y la longitud máxima de los drenes subterráneos. La profundidad de estos drenes debe permitir un salto de agua en el punto de descarga de los laterales; por lo tanto, se deben construir entre 40 y 50 cm por debajo de los desagües de estos últimos. Con frecuencia, los drenes colectores se localizan de tal forma que sirvan como linderos entre fincas, y de acuerdo con la topografía se ubican en las partes más bajas tratando, en lo posible, que queden en línea recta.

Drenes topo. Son conductos subterráneos no revestidos que se construyen sin necesidad de excavaciones y ayudan a la evacuación del exceso de agua de los estratos superiores del suelo. Este tipo de drenaje es apropiado en áreas con suelos arcillosos, de alta densidad aparente, poco permeables y con una pendiente general mayor de 0.4%.

La construcción de este tipo de drenes requiere suelos estables y de alta plasticidad, con un mínimo de 35% de arcilla y un máximo de arena de 20%, y que al momento de la labor el contenido de humedad en el suelo se encuentre entre 40% y 80% de su capacidad de retención. Las fisuras que se producen cada vez que se renuevan los drenajes topo crean gradualmente una mejor estructura del suelo y aumentan su permeabilidad.

El espaciamiento entre estos drenes debe ser de 2 a 5 m, la profundidad de 50 a 60 cm, la pendiente de 0.4% a 4%, la longitud máxima de 150 m y se deben entubar en los 2 ó 3 m finales para que la descarga sea libre y el colector no se deteriore.

Drenajes

Drenes entubados. El drenaje subterráneo en caña de azúcar se compone de varias líneas de tubería, que se instalan a una profundidad entre 1.5 y 2.0 m, con el fin de abatir el nivel freático y mantenerlo a una profundidad entre 1.0 y 1.20 m de la superficie del suelo.

Para la construcción de estos drenes se utiliza actualmente tubería de PVC corrugada y perforada, con diámetros de 65, 80, 100 y 150 mm, que se encuentra disponible en el mercado en rollos de 100 a 200 m. Esta tubería tiene alta resistencia y es fácil de instalar sobre una cama de grava fina de 10 cm de espesor con una capa de 20 cm del mismo material filtrante.

Espaciamiento entre drenes entubados. Para el cálculo del espaciamiento entre drenes entubados existen varias fórmulas, entre ellas las más utilizadas son la de Hooghoudt y la de Glover Dumm.

La ecuación de Hooghoudt requiere que el nivel freático se mantenga a una profundidad casi constante durante largos períodos de tiempo y que el perfil del suelo tenga dos estratos principales de diferente conductividad hidráulica, con los drenes situados cerca o en el límite de ambos estratos, como se observa en la Figura 7.

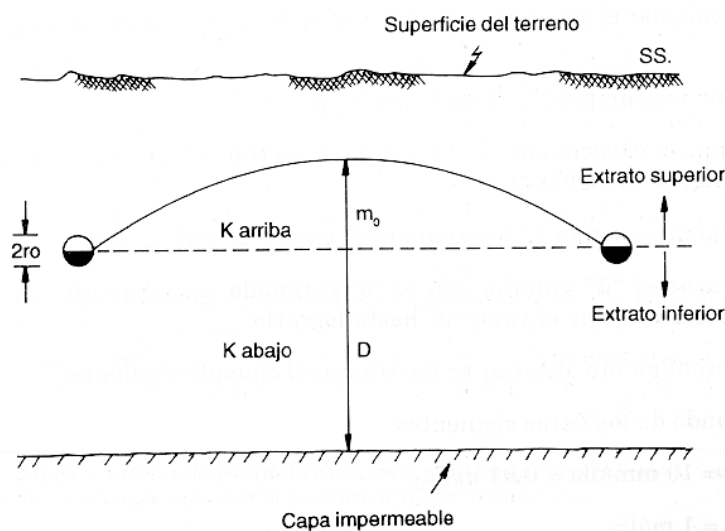


Figura 7. Drenes entubados paralelos en suelos con una capa impermeable a profundidad limitada.

— La ecuación de Hooghoudt es la siguiente:

$$L^2 = \frac{8 K \text{ abajo} \cdot d \cdot m_0 + 4 K \text{ arriba} \cdot m_0^2}{q}$$

donde:

- L = espaciamiento entre drenes entubados (m)
- K abajo = conductividad hidráulica por debajo del nivel de los drenes (m/d)
- K arriba = conductividad hidráulica arriba del nivel de los drenes (m/d)
- m_o = altura desde el nivel de los drenes hasta el nivel freático, en el punto medio entre éstos (m)
- q = cantidad de agua que deben evacuar los drenes (m/día)
- d = profundidad equivalente de Hooghoudt (m), en función del espaciamiento (L), el radio del tubo (r_o) y la altura desde los drenes hasta la capa impermeable sobre la cual se apoya el acuífero (D).

Cuando los drenes se instalan sobre una zanja excavada, el valor de r_o será igual al perímetro mojado del canal dividido entre π

Para calcular el espaciamiento entre drenes (L), se sugiere el procedimiento siguiente:

1. Asumir una profundidad equivalente (d).
2. Calcular el espaciamiento entre drenes (L) con “d” estimado, utilizando la ecuación de Hooghoudt.
3. Utilizando la Tabla 5, determinar “d” con el “L” calculado.
4. Comparar el “d” anterior con el “d” estimado inicialmente. Si éstos no coinciden, corregir el valor “d” hasta lograrlo.

El procedimiento anterior se ilustra con el ejemplo siguiente:

Partiendo de los datos siguientes:

$$q = 10 \text{ mm/día} = 0.01 \text{ m/día}$$

$$K = 1 \text{ m/día}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$m_o = 0.50 \text{ m}$$

$$r_o = 0.04 \text{ m}$$

Calcular el espaciamiento (L) entre drenes entubados.

1. Se asume el valor para la profundidad equivalente (d), d = 4 m;

Drenajes

2. Se calcula el valor L:

$$L^2 = (8 \times 1 \times 4 \times 0.5 + 4 \times 1 \times 0.5 \times 0.5) / 0.01 = 1700$$

$$L = 41 \text{ m}$$

3. De acuerdo con la Tabla 5, se determina el valor $d = 2.35$, el cual es diferente al que se estima inicialmente.

4. Se estima un nuevo valor, $d = 2$ m. Se calcula de nuevo $L = 30$ m, a partir de la Tabla 5, $d = 2.01$ m que es prácticamente igual al estimado.

En este caso, el espaciamiento (L) calculado es de 30 m.

— La ecuación de Glover-Dumm se aplica cuando el problema de drenaje interno se asimila a un modelo de flujo no permanente, en el cual el nivel freático se eleva repentinamente por efecto de recargas fuertes, por ejemplo, lluvias intensas seguidas de un período seco (Figura 8).

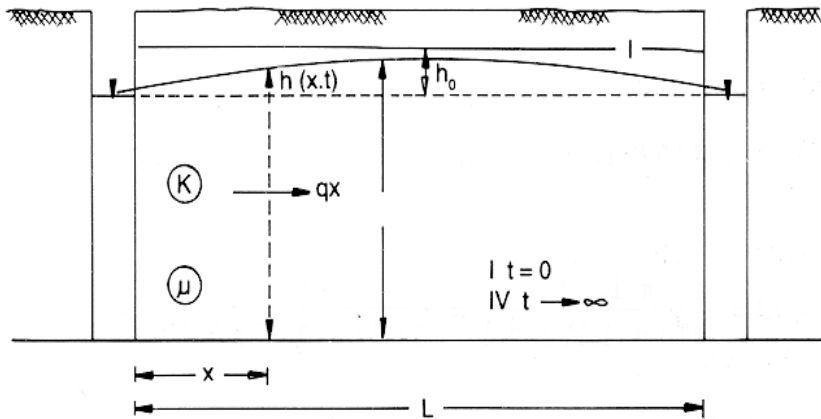


Figura 8. Situación antes y después de la elevación instantánea de la capa freática (modelo de flujo no permanente para usar la ecuación de Glover-Dumm).

Situación en la cual el espaciamiento entre drenes se determina mediante la fórmula siguiente:

$$L^2 = \frac{\pi^2 Kdt}{U \ln(1.17 h_0/ht)}$$

donde:

L = espaciamiento entre drenes (m)

K = conductividad hidráulica (m/día)

- d = profundidad equivalente de Hooghoudt (m)
- t = tiempo (días) requerido para que descienda el nivel freático. En caña de azúcar, el tiempo requerido para que el nivel freático descienda 0.5 m a partir de la superficie del suelo es de 4 días
- U = coeficiente de almacenamiento o porosidad drenable, expresada en fracción decimal (U = porosidad total - capacidad de campo)
- Ln = Logaritmo natural
- h_o = altura desde el nivel de los drenes hasta el nivel freático cuando éste se eleva casi instantáneamente por efecto de la lluvia o el riego (m)
- h_t = altura desde el nivel de los drenes hasta el nivel freático cuando éste ha descendido totalmente por efecto de los drenes (m).

Ejemplo del cálculo de espaciamiento entre drenes, utilizando la ecuación de Glover-Dumm y partiendo de los valores siguientes:

- K = 1 m/d; profundidad de drenes = 1.8 m
- h_o = 0.8 m; h_t = 0.3 m
- D = 8.0 m
- U = 0.05 ; t = 10 días, r_o = 0.1 m

$$L^2 = \frac{\pi^2 K d t}{U \text{Ln} (1.17 h_o/h_t)} = \frac{\pi^2 \cdot 1 \cdot d \cdot 10}{0.05 \text{Ln} (1.17 \times 2.67)} = 1734.81d$$

$$L = 41.65 (d)^{1/2}$$

1. Primer tanteo: L = 80 m, utilizando la Tabla 5,

$$\frac{L}{r_o} = \frac{80}{0.1} = 800 ; \frac{D}{r_o} = \frac{8}{0.1} = 80 \quad \delta = 45.2$$

$$d = 4.52$$

$$L = 41.65 \times (4.52)^{1/2} = 88.55 \text{ m}$$

2. Segundo tanteo: L = 90 m, utilizando la Tabla 5,

Drenajes

$$\frac{L}{r_o} = 900; \frac{D}{r_o} = 80 \quad \delta = 47.4 \quad d = 4.74$$

$L = 41.65 \times (4.74)^{1/2} = 90.60$, que es prácticamente igual al propuesto.

Capacidad de descarga de tuberías de drenaje subterráneo

- Bajo régimen de flujo permanente:

$$Q = q \cdot L \cdot M / 86,400$$

donde:

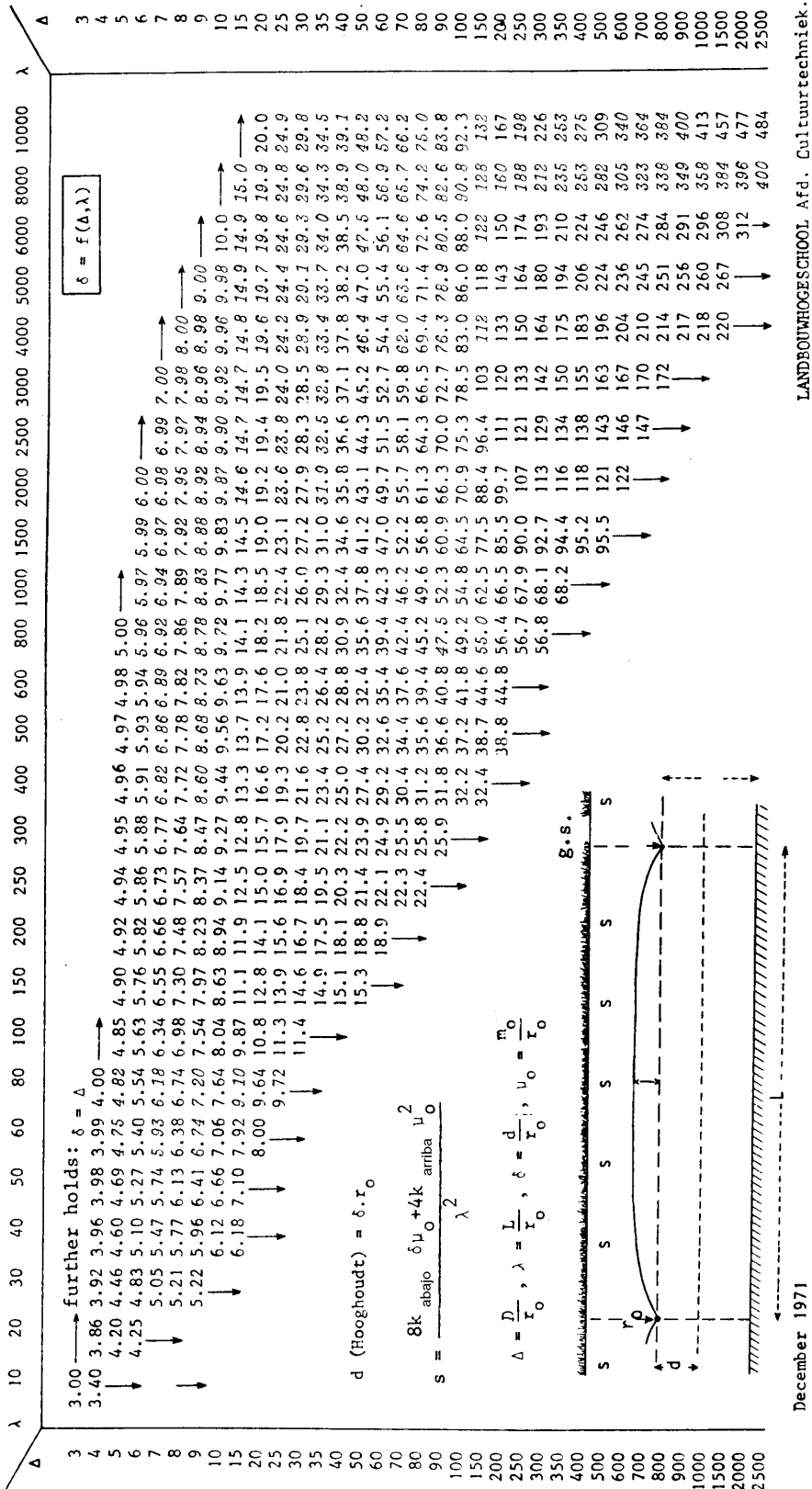
- Q = caudal de descarga de los drenes entubados (m³/seg)
- q = lámina de agua que debe ser evacuada por los drenes (mm/día)
- L = espaciamiento entre drenes (m)
- M = longitud de los drenes (m)

- Bajo régimen de flujo variable:

$$Q = \frac{0.073 K D'}{L} h_o \cdot M$$

donde:

- Q = caudal en l/seg
- K = conductividad hidráulica (m/día)
- $D' = d + \frac{h_o + h_t}{2}$
- d = profundidad equivalente de Hooghoudt
- h_o = altura del nivel freático en relación con el nivel de los drenes, después de la lluvia crítica (m)
- h_t = altura del nivel freático sobre el nivel de los drenes después de un tiempo t (m)
- L = espaciamiento entre drenes (m)
- M = longitud del dren (m)



LANDBOUWHOOGESCHOOL Afd. Cultuurtechniek.

Tabla 5. Valores δ para calcular la profundidad equivalente "d" de Hooghoudt (de Zeeuw).

Referencias

- ASOCIA (Asociación de Ingenieros Agrícolas del Valle del Cauca). 1988. Cálculos de espaciamiento entre drenes y sistemas de drenaje interno. En: Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Universidad Nacional de Colombia, Corporación del Valle del Cauca (CVC) p. 196-249.
- CENICAÑA (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia). 1991. Efecto del nivel freático en la producción. En: Informe Anual 1991. p. 32-33.
- ILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement). 1974. Drainage principles and applications. Wageningen, Holanda. Publication no. 16:1-4.
- Rojas, R. 1976. Drenaje superficial de tierras agrícolas. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT), Venezuela.



Referencia bibliográfica

CRUZ, R. Drenajes. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. p.211-233.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LA CAÑA
DE AZÚCAR DE COLOMBIA - CENICAÑA

Estación Experimental: vía Cali-Florida, km 26

Tel: (57) (2) 6648025 - Fax: (57) (2) 6641936

Dirección postal: Calle 58 norte no. 3BN-110

Cali, Valle del Cauca-Colombia

www.cenicana.org

buzon@cenicana.org