

INTRODUCCION

La principal zona agrícola de la Costa Caribe de Colombia, es el Valle del río Sinú, el cual posee unas 400.000 hectáreas de tierras que podrían ser adecuadas para la agricultura intensiva. La agricultura comercial de gran escala se desarrolla en la parte media y baja del valle, principalmente dentro del distrito de riego y drenaje Montería - Mocarí, el cual tiene un área cultivable de 47.000 hectáreas, beneficiadas con canales de drenaje primarios y secundarios y la infraestructura correspondiente. Sin embargo, la adecuación de muchos lotes agrícolas aún es precaria e insuficiente para el drenaje adecuado, sobre todo en los años de lluvias frecuentes e intensas, las cuales producen excesiva humedad en la zona de raíces, causan encharcamientos, y son en conjunto con el uso de la maquinaria, los principales causantes del deterioro por compactación de los suelos. Como consecuencia, las variedades cultivadas no pueden expresar su potencial productivo o se presentan altas pérdidas de la producción.

La zona agrícola presenta dificultades para el drenaje adecuado por su condición de estar situada sobre la planicie aluvial con suelos francoarcillosos, con pendientes menores del 3%, microrelieve ondulado y nivel freático alto. Adicionalmente, existe el riesgo de degradación de los suelos por salinización ocasionada por la elevación del nivel freático, quedando las sales en la zona de raíces o sobre el suelo, cuando no hay evacuación de los excesos y el agua se evapora. Hay que tener en cuenta que la planicie aluvial posee una cuña salina localizada a poca profundidad.

El drenaje agrícola, definido como el conjunto de obras que permiten remover los excesos de humedad del suelo con el fin de crear un ambiente apropiado para el desarrollo de las raíces y mejorar la absorción de agua y nutrientes, es la técnica de ingeniería que más podría contribuir a darle seguridad a la producción, aumentar los rendimientos y el beneficio económico en la producción de algodón en el Valle del Sinú.

Esta presentación tiene dos objetivos: 1. Activar la conciencia de los agricultores y asistentes técnicos acerca de la importancia de mantener un drenaje adecuado de los lotes agrícolas; y, 2. Recordar y revisar algunos conceptos relacionados con el drenaje superficial, tales como las propiedades del suelo y su relación con el agua, el diseño y los cálculos del drenaje superficial y la construcción y mantenimiento de los canales.

INFLUENCIA DEL MAL DRENAJE EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

El exceso de humedad afecta desfavorablemente a algunas propiedades físicas del suelo de importancia para el desarrollo de los cultivos. El efecto más importante es la disminución de la aireación en la zona radicular. Otras propiedades físicas afectadas son la estructura, la permeabilidad y la temperatura. Veamos algunas particularidades sobre cada una de ellas.

Aireación

El exceso de humedad ocasiona una disminución del contenido de aire del suelo, siendo esta la alteración que mayor perjuicio causa a los cultivos por su efecto directo sobre la respiración de las raíces y la modificación de la actividad microbiana. El oxígeno atrapado y el disuelto en el agua del suelo se consume rápidamente y aumenta el nivel de CO_2 . Se trastorna la fisiología de las raíces, dificultando la absorción de agua y nutrientes y su transporte a las partes aéreas de la planta, todo lo cual se traduce en disminución de la producción. Sin embargo, las plantas resisten algún tiempo con el suelo saturado (un o dos días) sin disminuir la producción. Además, las necesidades de oxígeno de las plantas es muy diversa como lo muestra la Tabla 1, adaptada de PIZARRO (1978).

Tabla 1. Tolerancia de cultivos a déficit de oxígeno y exceso de gas carbónico

Tolerancia	a déficit de O_2	a exceso de CO_2
Tolerancia alta	arroz	
O_2 : 0 - 1%	caña de azúcar	cítricos
CO_2 : > 2%	varios pastos	
	algunos maderables	
Tolerancia media	algodón	tomate
O_2 : 2 - 5%	cítricos	girasol
CO_2 : 10 - 20%	soya	
	plátano	
Tolerancia baja	maíz	tabaco
O_2 : 10%	frijoles	
CO_2 : 10%	tabaco	

Los porcentajes indican la concentración a partir de la cual el crecimiento se ve afectado.

Cuando el oxígeno disponible desciende, las raíces disminuyen su actividad respiratoria, y en consecuencia disminuyen también sus actividades fisiológicas, con las siguientes consecuencias:

1. Disminuye la absorción de iones, en el siguiente orden: K, N, P_2O_5 , Ca y Mg.
2. Disminuye el transporte de estos iones a las partes aéreas
3. Disminuye la absorción de agua.

Con la disminución del contenido de O_2 la microflora aerobia desaparece gradualmente, siendo sustituida por organismos anaerobios, cuyas actividades tienen los siguientes efectos:

1. Reducción de algunas sustancias, como Fe y Mn, a formas más solubles que pueden producir toxicidad. Los sulfatos se reducen a sulfuros formando sales, como SFe o SH_2 , que también son tóxicos. También se produce gas metano.
2. La cantidad de nitrógeno asimilable disminuye, por la disminución en la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias y porque las bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, como Azotobacter, desaparecen de los terrenos mal drenados.

En consecuencia, el NO_3 se reduce progresivamente a NO_2 , N_2O y NH_3 o N_2 y en sus formas gaseosas el N_2 escapa fácilmente del suelo.

¹ Ingeniero Agrícola, Investigador, C.I. Turipaná, Km 13 vía Montería - Cereté. Tel. (094)7860219.
E-mail: corpoica@monteria.cetcol.net.co

La disminución de N asimilable ocasiona reducciones fuertes en la producción, que solo parcialmente se compensan con aplicaciones de abonos en forma de nitratos.

Estructura

El exceso de sales está asociado al mal drenaje y ocasiona alteraciones en la estructura del suelo, que pueden llegar hasta su total deterioro. Además, el exceso de humedad afecta la estructura porque facilita la compactación por el paso de la maquinaria agrícola. En suelos saturados el desarrollo de las raíces es menor, sobre todo en profundidad, lo que indirectamente afecta la estructura. Por lo tanto, los suelos mal drenados presentan una estructura más desfavorable, compacta y poco permeable que la de los suelos con buen drenaje.

Permeabilidad

Todos los agentes que modifican la estructura tienen efecto sobre la permeabilidad. La mejora del drenaje ocasiona un cierto aumento de la permeabilidad, debido a las grietas que se forman durante la alternancia de estados secos y húmedos y a la mayor penetración de las raíces. El efecto mejorador de la permeabilidad es más notorio en suelos arcillosos.

Temperatura

Aunque en nuestro clima cálido una menor temperatura de un suelo húmedo puede ser una condición favorable, se encuentran diferencias de temperatura de hasta 5 °C entre un suelo húmedo y un suelo seco en igualdad de las demás condiciones.

Salinidad

En la mayoría de los casos, la salinidad de los suelos es consecuencia de un drenaje deficiente. En los terrenos mal drenados se acumulan las sales disueltas en el agua de escorrentía, pudiendo salinizar la solución del suelo y sodificar el complejo de cambio.

Profundidad óptima de la capa freática

Este es un dato fundamental para el cálculo de la profundidad de los canales de drenaje o zanjas; su espaciamiento, diámetro, sección u otras características. Sin embargo, los conocimientos no son definitivos debido a la complejidad fisiológica del fenómeno y a la intervención de factores económicos y técnicos.

Tabla 2. Profundidad de raíces de varios cultivos

Cultivo	Profundidad de las raíces (cm.)		
	Zona de ramificación densa	Zona de ramificación moderada	Profundidad extrema
Algodón	70	120	
Maíz	70	70-140	150-180
Sorgo	65		
Caña de azúcar	70		
Tomate	60	60-90	120
Pimentón	30-45	45-90	120
Melón	20-30	30-90	90-120
Frijoles	30	30-75	90
Cítricos	75		

Fuente: PIZARRO (1978)

La profundidad óptima de la capa freática es aquella que no causa disminución en las producciones. Definir una profundidad óptima presenta dificultades de tipo técnico y económico, ya que las decisiones exigen tener en cuenta la relación beneficio/costo. La primera dificultad es que no hay datos para conocer la disminución de las producciones causadas en los cultivos por los diferentes niveles freáticos. Por otra parte, el costo de las obras de drenaje varía mucho de un lugar a otro, dependiendo de la cercanía a los drenes principales, la necesidad de evacuar excesos provenientes de lotes vecinos y sobre todo por las necesidades de instalación de equipos de bombeo. Además, la capa freática no se mantiene estática. No obstante, en la Tabla 2 se indica la profundidad de las raíces de los cultivos más usuales. Según PIZARRO (1978), el algodón alcanza una profundidad de 120 cm. Sin embargo, en los suelos francos y francoarcillosos de la zona algodонера del valle del río Sinú, la profundidad de raíces oscila entre 50 y 80 cm. a la cosecha.

Las profundidades recomendables del nivel freático para algunos cultivos, experimentadas en Holanda y aplicadas con éxito en proyectos de drenaje de España y Brasil, se presentan a continuación:

Tabla 3. Profundidad recomendable de la capa freática

Días después de la lluvia	Profundidad de la capa freática, (cm.)		
	Clase A	Clase B	Clase C
0	30	50	90
1	50	80	110
2	70	100	130
3	80	110	140

Tomado de PIZARRO (1978)

Clase A: Pastos y Hortalizas

Clase B: Cultivos temporales

Clase C: Árboles frutales

Prácticas culturales en suelos mal drenados

La solución ideal para un suelo con exceso de humedad es la instalación de un sistema de drenaje adecuado. En la mayoría de los casos, las obras necesarias no se pueden incluir dentro de las prácticas culturales, pero a veces es suficiente con la mejora del drenaje superficial, lo cual puede ser realizado directamente por los agricultores, abriendo zanjas de drenaje, eliminando los pequeños bajos, etc.

Hay algunas prácticas culturales que disminuyen el efecto perjudicial del mal drenaje: La primera práctica consiste en la selección adecuada de los cultivos. Otra práctica recomendable es el empleo de abonos nitrogenados en forma de nitratos, para compensar la menor producción de nitrógeno asimilable procedente de la mineralización de la materia orgánica.

Las labores agrícolas no deben ejecutarse con una humedad excesiva en el suelo, pues el paso de las máquinas deteriora su estructura.

El uso de subsoladores mejora la aireación del suelo y su drenaje, pero debe realizarse durante la temporada seca, cuando la humedad del suelo permita la producción de grietas.

PROPIEDADES DEL SUELO RELACIONADAS CON EL DRENAJE

Casi todas las propiedades del suelo afectan de un modo más o menos directo el drenaje, pero para efectos del cálculo de la red de drenaje, se tienen en cuenta solo la porosidad drenable, la permeabilidad y la capilaridad.

Retención del agua por el suelo

Al volumen total de poros del suelo se le llama porosidad total y se expresa como porcentaje o como tanto por uno del volumen total. Se designa por la letra e y su valor viene dado por la fórmula:

$$e = 100(1 - d_a/d_r) \quad (1)$$

d_a = densidad aparente

d_r = densidad real

Cuando todos los poros del suelo están llenos de agua se dice que el suelo está saturado. Cuando el suelo se drena, los espacios vacíos son ocupados por aire. Esta agua no retenida por el suelo se llama agua libre o gravitacional. El drenaje continúa hasta que el suelo no pierde más agua y en ese estado se dice que el suelo está a capacidad de campo (C.c.): los poros más pequeños retienen el agua contra la fuerza de la gravedad y los poros mayores están ocupados por aire. Esta es la situación favorable al desarrollo de los cultivos que encuentran en el suelo agua abundante retenida con una energía fácilmente superada por la de succión de las raíces. Sin embargo, la capacidad de campo es difícil de precisar, por lo cual para efectos prácticos se admite que el suelo está a capacidad de campo dos o tres días después de iniciado el drenaje, a lo que corresponde una tensión de humedad de 100 - 200 cm. También se usa el concepto de "humedad equivalente", que es la retenida por el suelo cuando a una muestra se le aplica una fuerza de extracción de 1/3 de atmósfera (333 cm.).

El contenido de agua del suelo puede descender por debajo de la capacidad de campo como consecuencia de la evaporación y la transpiración de las plantas. La humedad disminuye y se hace más difícil la absorción de agua por las raíces, hasta que se alcanza el denominado punto de marchitez (P.m.) en el cual las plantas experimentan una marchitez irreversible. En ese estado, el agua es retenida con una presión de 15 atm (15.000 cm.) que es difícil de contrarrestar por la presión de succión del sistema radicular de la mayoría de los cultivos.

La cantidad de agua que existe en los estados de capacidad de campo, humedad equivalente, o punto de marchitez, se expresa en % en peso respecto al suelo seco, o en % en volumen. Entre ambas medidas existe la siguiente relación:

$$H_v = H_p \times d_a \quad (2)$$

H_v = Contenido de humedad en % en volumen

H_p = Contenido de humedad en % en peso

d_a = Densidad aparente

Tabla 4. Tensión de humedad del suelo a diferentes contenidos

Estado	Tensión de humedad		Diámetro equivalente de los poros (micras)
	atm	cm	
Saturación		1	3000
Fin drenaje rápido		63	50
Capacidad de campo		100-200	30-15
Humedad equivalente	1/3	333	9
Fin drenaje lento	1	1000	3
Punto de marchitez	15	15000	0.2

La cantidad de agua comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez es el agua útil (A.u.), es decir, la cantidad de agua que puede retener el suelo y que puede ser aprovechada por las plantas.

Porosidad drenable

Se llama porosidad drenable al volumen en % de los poros ocupados por el aire cuando el suelo está a capacidad de campo. Esta característica recibe los nombres de porosidad no capilar, volumen drenable de poros, porosidad efectiva, etc. Se representa por la letra μ y se obtiene de la siguiente expresión:

$$\mu = e - C.c. \quad (3)$$

μ = porosidad drenable

e = porosidad total

$C.c.$ = capacidad de campo

La porosidad drenable es la característica del suelo de gran importancia para el drenaje, porque representa la fracción de suelo por la que se mueve el agua que excede la capacidad de campo y que se debe drenar. El volumen de suelo V_a ocupado por el agua libre, si V_s es el volumen del suelo, será:

$$V_a = \mu V_s \quad (4)$$

Esta relación es de gran importancia en los cálculos de drenaje, aunque normalmente en vez de volúmenes se utilizan alturas de agua. Si en un suelo a capacidad de campo se infiltra una altura L de agua, el nivel freático se eleva en una altura h dada por:

$$h = L/\mu \quad (5)$$

A continuación veamos un ejemplo de utilización de los conceptos anteriores:

1. Suelo franco arcilloso de Cereté:

$$d_a = 1.48$$

$$d_r = 2.56$$

$$C.c. = 34.8 \text{ (volumen)}$$

$$P.m. = 26.4 \text{ (volumen)}$$

$$\text{Agua útil} = C.c. - P.m. = 8.4$$

$$e = 100(1 - d_a/d_r) = 42.19$$

$$\mu = e - C.c. = 7.39\% = 0.07$$

Si este suelo se encuentra a capacidad de campo y recibe una lluvia que infiltra en el suelo 60 mm., la elevación del nivel freático será :

$$h = L/\mu = 60/0.07 = 857 \text{ mm.}$$

2. Suelo arcillo arenoso de Ciénaga de Oro :

$$d_a = 1.35$$

$$d_r = 2.60$$

$$C.c. = 26.8 \text{ (volumen)}$$

$$P.m. = 16.6 \text{ (volumen)}$$

$$\text{Agua útil} = 10.2$$

$$e = 100(1 - d_a/d_r) = 48.08$$

$$\mu = e - C.c. = 21.28\% = 0.21$$

Con una lluvia de 60 mm infiltrados, el nivel freático se eleva ;

$$h = L/\mu = 60/0.21 = 286 \text{ mm.}$$

A pesar de la misma lámina de agua infiltrada, se producen elevaciones freáticas muy diferentes, en función de la porosidad drenable del suelo.

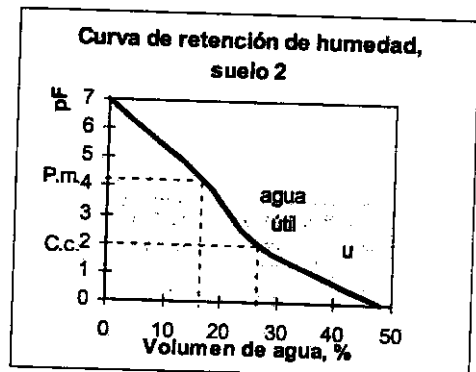
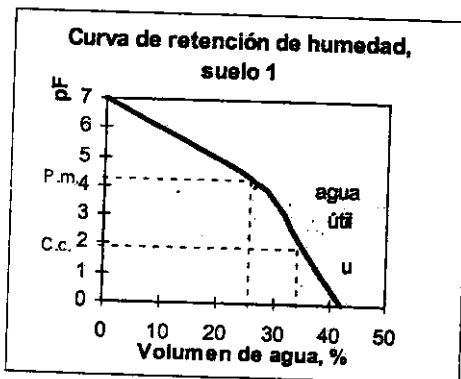
Curvas de retención de humedad

Son unos gráficos que relacionan la tensión de humedad con el contenido de humedad del suelo. Estas curvas se usan para:

- Calcular el agua útil del suelo
- Calcular la porosidad drenable
- Comprobar cambios en la estructura del suelo
- Relacionar la tensión de humedad con otras propiedades

La Figura 1 muestra las curvas de retención de humedad de los dos suelos antes considerados. La ausencia de humedad corresponde a una tensión de humedad de 10^7 cm ($pF = 7$).

Figura 1. Curvas de retención de humedad de dos suelos



Aplicaciones de las relaciones suelo - agua a los cálculos de drenaje

Los conceptos de capacidad de campo, punto de marchitez, porosidad drenable, etc., son de constante aplicación en cálculos de riego y drenaje. Se emplean para determinar la dosis y frecuencia del riego, y permiten calcular la respuesta de la capa freática ante el riego y la lluvia. Las unidades utilizadas se expresan de dos formas:

- Volumen de agua por unidad de superficie, en m^3/ha
- Altura de agua, en mm.

Entre ambas unidades existe la siguiente relación:

$$1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$$

En cálculos de drenaje se emplea la unidad de altura de agua o lámina. La relación entre las unidades que expresan caudal por unidad de superficie, es :
 $1 \text{ mm}/\text{día} = 0.1157 \text{ l}/\text{seg}.\text{ha}$

Ejemplo:

Datos del suelo:

$$d_a = 1.5$$

$$d_r = 2.52$$

$$P.m. = 18\%$$

$$A.u. = 16\%$$

El suelo está a capacidad de campo. La profundidad de la capa freática, leída en un pozo de observación, es de 2.50 m. Llueven 63 mm. de los cuales el 25% se pierde por escorrentía. Calcular la nueva profundidad freática :

$$e = 100 (1 - d_a/d_r) = 100 (1 - 1.5/2.52) = 40\%$$

$$C.c. = P.m. + A.u. = 18 + 16 = 34\%$$

$$\mu = e - C.c. = 0.40 - 0.34 = 0.06$$

$$h = L/\mu = 63 \times 0.75/0.06 = 787 \text{ mm.} = 0.78 \text{ m.}$$

$$\text{Luego la nueva profundidad freática será : } p_2 = p_1 - h = 2.50 - 0.78 = 1.72 \text{ m.}$$

Conductividad hidráulica

Es una de las propiedades hidrodinámicas más importantes del suelo. Permite conocer la facilidad con que el agua puede fluir a través del suelo. La conductividad hidráulica de un suelo (K) está relacionada con la ley de Darcy, la cual cuantifica la velocidad del agua en el suelo y cuyo parámetro fundamental es precisamente K.

La determinación de K es de mucha utilidad en el drenaje agrícola. La K es función de la textura y estructura del suelo, del contenido de materia orgánica, de la presencia de sales y del contenido de humedad.

El método más común de determinar K es el del *agujero barrenado*, que consiste en perforar un hueco en el suelo hasta la profundidad deseada, extraer el agua freática y medir la recuperación del pozo con un flotador. Solo es utilizable cuando la capa freática está presente.

Tabla 5. Valores típicos de conductividad hidráulica (K)

Tipo de suelo	K (cm/seg)
Grava limpia	> 1.0
Arena gruesa	10 - 0.01
Mezcla de arena	0.01 - 0.005
Arena fina	0.005 - 0.001
Arenolimoso	0.002 - 0.0001
Limoso	0.0005 - 0.00001
Arcilloso	< 0.00001
Suelos agrícolas	0.001 - 0.00001

Fuente: Enciclopedia Agropecuaria TERRANOVA, Tomo 5.

Cuando no se alcanza la capa freática y se requiere conocer la permeabilidad del suelo, se usa el método del *agujero barrenado inverso*, en el cual el agujero se llena con agua y se determina su velocidad de descenso.

DRENAJE SUPERFICIAL

El drenaje superficial es el conjunto de técnicas de ingeniería que permiten mantener unas condiciones de humedad y aireación adecuadas para el normal desarrollo de los cultivos. Consiste en el estudio de las fuentes de exceso de humedad superficial y los problemas asociados con niveles freáticos altos.

El drenaje natural de las aguas superficiales puede ser mejorado por medio de obras que se pueden agrupar en dos clases:

- Emparejamiento o nivelación del terreno
- Construcción de una red de drenaje

El emparejamiento del terreno consiste en la corrección de las irregularidades superficiales pequeñas, destinado a asegurar una pendiente continua desde todos los puntos del lote hasta un canal de drenaje. Esta es la práctica más barata y de mayor productividad del drenaje y se debe realizar después de terminar el laboreo de preparación del suelo para la siembra, utilizando para ello cuchillas acoplables a los tractores o motoniveladoras.

La nivelación del terreno para el drenaje superficial, consiste en cortes y rellenos basados en rasantes especificadas, hasta conseguir una superficie continua nivelada y con pendiente descendiente hacia los drenajes superficiales. Esta operación se efectúa una sola vez con buldózers y traillas.

Sistema de drenaje superficial a nivel predial

Consiste en el diseño y construcción de una red de canales en forma de V muy abierta, destinados a interceptar la escorrentía superficial y conducir los excesos de lluvia a los canales principales o a la zona de evacuación. Adicionalmente se requiere una red de canales superficiales de pendiente muy suave que permitan el cruce de la maquinaria agrícola.

Las dimensiones de los canales superficiales están condicionadas más por las necesidades de instalación y construcción que por las de diseño hidráulico. La pendiente lateral debe ser de 1 : 8 a 1 : 10, con una profundidad mínima de 25 cm. y pendiente longitudinal mínima de 0.1%. El distanciamiento entre drenes superficiales varía en la práctica entre 100 y 200 m. La Figura 2 muestra el perfil típico para esta clase de drenes prediales.

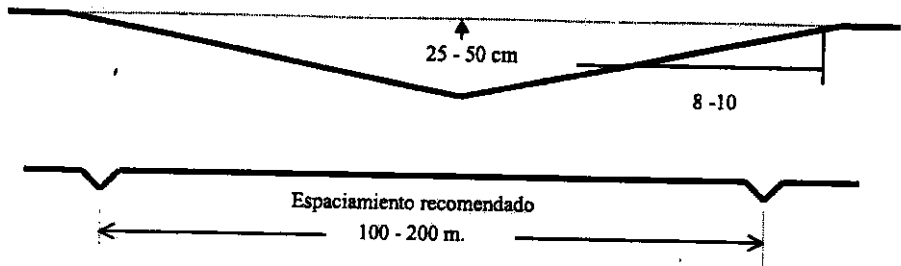


Figura 2. Sección transversal en V de un dren superficial y espaciamiento recomendado

Diseño de canales colectores e interceptores

La construcción de la red de canales colectores e interceptores de escorrentía superficial y de las obras hidráulicas complementarias, es la parte más costosa de la adecuación de tierras para la agricultura, por lo cual su diseño debe ser realizado por ingenieros experimentados.

A continuación se presenta la metodología general a seguir para el diseño de canales de sección trapezoidal, advirtiendo que cada proyecto de drenaje es un caso particular que requiere diferentes ajustes.

Caudal a evacuar

Para determinar las dimensiones de los canales es necesario calcular los caudales a evacuar, que para nuestra zona agrícola, son los de escorrentía superficial ocasionada por la lluvia y que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = A i C / 360 \quad (6)$$

Q = Caudal a evacuar, en m³/seg

C = Coeficiente de escorrentía, adimensional

i = Máxima intensidad media de la lluvia crítica, en mm/h

A = Superficie de la cuenca aportante, en has.

1/360 = Coeficiente de transformación de unidades

Coeficiente de escorrentía (C)

El coeficiente de escorrentía C, es la fracción de la precipitación total que llega al punto de evacuación. Depende de factores topográficos, edafológicos, de la cobertura vegetal, etc. La Tabla 6 presenta los valores de C.

Tabla 6. Coeficientes de escorrentía según la cobertura vegetal y la pendiente

Tipo de vegetación	Pendiente %	Textura		
		Franco-arenosa	Franco-limosa Francoarcillolimosa	Arcillosa
Suelos cultivados	0-5	0.30	0.50	0.60
	5-10	0.40	0.60	0.70
	10-30	0.50	0.70	0.80
Potreros	0-5	0.10	0.30	0.40
	5-10	0.20	0.35	0.50
	10-30	0.30	0.40	0.60
Forestal	0-5	0.10	0.30	0.40
	5-10	0.20	0.35	0.50
	10-30	0.30	0.40	0.60

Fuente: PIZARRO (1978)

Máxima Intensidad Media de la Lluvia Crítica (i)

Por cuestiones económicas y de seguridad, se establece el periodo de retorno T de la lluvia crítica y se calcula la sección de los canales de drenaje para la escorrentía que se presenta una vez cada T años. Para establecer i se recurre a los datos pluviográficos o pluviométricos de las estaciones meteorológicas de la zona en estudio.

Area de la cuenca aportante (A)

Aunque su determinación corresponde a un trabajo de topografía, es necesario ser cuidadoso al determinar dicha área, sobre todo en terrenos de baja pendiente en los cuales además, se requiere evacuar caudales de lotes vecinos.

Cálculo del caudal a evacuar en el valle del río Sinú

Para efectos de cálculos de obras de drenaje superficial en la cuenca del río Sinú, se utiliza la fórmula dada por G. WILLIAMS (), la cual se adapta bien a la zona y está dada para una precipitación máxima o lluvia crítica de 120 mm., en 24 horas, con un periodo de retorno T de 20 años. La relación es:

$$Q = 0.55A^{0.66} \quad (7)$$

Q = caudal a evacuar, en m³/seg

A = Area de drenaje, en Km².

Veamos un ejemplo: Si $A = 350$ has = 3.5 Km² (área de la cuenca a drenar), entonces $Q = 0.55(3.5)^{0.56} = 1.56$ m³/seg.

Supongamos que estamos en el mes de octubre, con el suelo a capacidad de campo y se produjo la lluvia crítica de 120 mm. en 24 horas. Cuánta agua hay que evacuar y cuánto tiempo tarda?

Si 1 mm = 10 m³/ha, entonces 120mm. = 1200 m³/ha

En 350 has serán 420.000 m³.

Asumamos que un 30% de la lluvia es retenida por el suelo, la vegetación, etc., luego el volumen de agua a evacuar será de :

$V = 420000 \times 0.7 = 294.000$ m³.

Nuestro canal de drenaje evacúa 1.56 m³/seg, por lo tanto tarda 52.4 horas en drenar el área.

Cálculo de la sección de los canales

Con la ecuación 7 se obtuvo el caudal a drenar o caudal de diseño. Ahora deben hacerse los cálculos hidráulicos de los elementos geométricos de la sección del canal, para lo cual se utiliza la ecuación de MANNING con los coeficientes para flujo uniforme, canales limpios recién construidos:

$$Q = (1/n)AR^{2/3}S^{1/2} \quad (8)$$

Q = Caudal de diseño, en m³/seg

n = Coeficiente de rugosidad, adimensional

A = Área de la sección transversal del canal, en m².

R = Radio hidráulico de la sección, en m.

S = Pendiente longitudinal del fondo del canal, decimal.

La Figura 3 muestra la sección transversal de un canal con sus atributos geométricos:

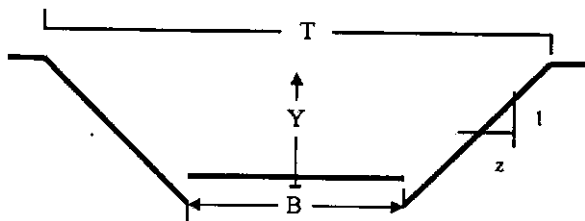


Figura 3. Sección transversal de un canal trapecoidal.

• Área de la sección: $A = (B + ZY) Y \quad (9)$

• Perímetro húmedo: $P = B + 2Y \sqrt{1+Z^2} \quad (10)$

• Radio hidráulico: $R = A/P = ((B+ZY)Y) / (B+2Y(\sqrt{1+Z^2})) \quad (11)$

• Ancho superior: $T = B + 2ZY \quad (12)$

B = Ancho del fondo del canal

Y = Profundidad de flujo

Z = Talud lateral

La pendiente del talud lateral debe establecerse de acuerdo a la clase de material del suelo. Los valores recomendados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 . Taludes recomendados para canales

Tipo de suelo	Pendiente del talud (vertical/horizontal)
Roca	1: 0.25
Arcilla, franco arcilloso	1: 0.75 a 1: 2
Arcilloarenoso y arenoso cohesivo	1: 1.5 a 1: 2.5
Arena ligera	1: 2 a 1: 4
Franco arenoso, arcilla porosa	1: 2 a 1: 3

Otro parámetro básico en diseño de canales es el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual se presenta en la Tabla 8 junto con las velocidades máximas permisibles para evitar la erosión.

Tabla 8. Velocidades máximas permisibles no erodables y valores de n.

Material	n	Agua clara (m/seg)	Agua con sedimentos coloidales (m/seg)
Arena fina coloidal	0.020	0.45	0.75
Franco arenoso	0.020	0.50	0.75
Franco limoso	0.020	0.60	0.90
Limos aluviales, no coloidales	0.020	0.60	1.10
Franco firme	0.020	0.75	1.10
Arcilla dura	0.025	1.10	1.50
Limos aluviales coloidales	0.025	1.10	1.50
Arcillas compactas	0.025	1.80	1.80

Fuente: ICA (1986)

Ejemplo: Calcular la sección del canal para un caudal de $Q = 1.56 \text{ m}^3/\text{seg}$
 $n = 0.020$ (canales mal conservados, con vegetación), Pizarro (1978).
 $S = 0.0020$ (pendiente del fondo, según plano topográfico)
 $nQ/vS = (0.020 \times 1.56)/v0.0020 = 0.7 = AR^{2.5}$
 $AR^{2.5} = ((B+ZY)Y)^{5/2} / ((B+ZY)(v+Z^2))$

Los trabajos de laboratorio consisten en hacer los análisis de suelos, que darán los datos necesarios para los cálculos de drenaje. En general, es necesario disponer de análisis de laboratorio de las propiedades físicas: densidad aparente, densidad real, humedad, textura y curva de retención de humedad a diferentes tensiones para cada uno de los estratos que puedan ser afectados por el proyecto. Dentro de los análisis químicos se requiere conocer los cationes absorbidos en el complejo de cambio, CIC, PSI, pH, conductividad eléctrica y análisis del agua freática.

Los trabajos de oficina comprenden la interpretación de datos y análisis, los cálculos necesarios de frecuencias de lluvias, caudal de diseño y escorrentía.

Se asumen valores de B y Z y por tanteos se encuentra un valor de Y que cumpla con la condición anterior :

$B = 0.4 \text{ m}$

$Z = 1.2$

Tenemos un valor de $Y = 0.90 \text{ m}$.

Por factor de seguridad se agrega un borde libre del 20% de Y, con lo cual el canal deberá tener una profundidad mínima de $Y_{\text{min}} = 1.10 \text{ m}$. Se chequea si está por debajo de la profundidad mínima según la rasante y el perfil del terreno. De lo contrario, hay que ampliar B y calcular una nueva Y que cumpla con esa condición.

La velocidad de flujo en este canal será:

$$V = Q/(B+ZY)Y = 1.56/(0.4+1.2 \times 0.9) \times 0.9 = 1.1 \text{ m/seg}$$

Esta velocidad está por debajo de la velocidad máxima permisible recomendada para que no cause erosión (1.2 m/seg), y por encima de la velocidad mínima que no producirá sedimentación y evitará el crecimiento de malezas acuáticas dentro del canal (0.75 m/seg), según VEN TE CHOW (1960).

Volumen de movimiento de tierra

El volumen de movimiento de tierra se calcula utilizando la siguiente ecuación :

$$V = A \times L = (B + ZY)YL \quad (13)$$

V = Volumen de excavación, en m^3 .

A = Área promedio de la sección transversal, en m^2 .

L = Longitud del canal, en m.

B = Base del fondo del canal, en m.

Z = Talud lateral, adimensional

Y = Profundidad promedio del canal, en m.

SISTEMATICA DE UN PROYECTO DE DRENAJE

Los proyectos de drenaje son obras de creación, en las que cada ingeniero tiene su forma personal de realizar el trabajo, por lo tanto es difícil establecer una sistemática de aplicación general. No obstante, hay una secuencia lógica que deben seguir los trabajos de campo, laboratorio y oficina desde las primeras visitas de reconocimiento hasta la redacción final del proyecto.

Los trabajos a realizar deben seguir la secuencia siguiente :

- Delimitación del área afectada
- Diagnóstico del problema
- Elaboración del proyecto
- Trabajos de campo
- Trabajos de laboratorio
- Trabajos de oficina

La delimitación del área afectada se basa en tres tipos de datos :

- Experiencia local
- Observaciones del nivel freático
- Análisis de suelos

El diagnóstico del problema consiste en la definición de las causas del mal drenaje, completada con análisis de suelo. Las causas del mal drenaje podrían ser debidas a la acción combinada de varias de las causas siguientes:

Topográficas: áreas bajas, sin salida por gravedad del agua donde el nivel freático puede estar muy cerca de la superficie durante largos periodos independientemente de la permeabilidad del suelo.

Suelos: La mayoría de los problemas de drenaje se deben a suelos impermeables o de permeabilidad reducida. A veces una capa impermeable a poca profundidad impide la salida del agua por gravedad.

Hidrológicas: Cuando se presentan lluvias intensas y frecuentes, los aportes de agua superan la capacidad de drenaje de la zona y se producen inundaciones.

Físicas: Obstrucción de los drenajes naturales y canales por obras mal diseñadas o mal construidas, especialmente en el cruce de vías.

La elaboración del proyecto exige realizar trabajos de reconocimiento de campo en el que debe determinarse la ubicación y capacidad de los drenes naturales y la ubicación y características de las fuentes de agua. Además, debe hacerse la toma de datos relacionados con topografía, hidrología.

suelos, climatología y agronomía.

Topografía: debe disponerse de los planos necesarios, en escala 1:2500. Los planos para un proyecto de drenaje exigen hacer levantamiento planimétrico y altimétrico, e incluir los perfiles de los drenes naturales longitudinales y transversales y relacionar las cotas de salida al río o canal principal, para conocer la profundidad máxima que puedan tener los canales de drenaje.

Hidrología: lo básico consiste en la instalación de pozos de observación del nivel freático y tomar las lecturas de los mismos. Además, pueden requerirse tomar medidas de los niveles del río o canales.

Suelos: Consiste en realizar sondeos con barreno para identificar los distintos estratos, medir la permeabilidad y tomar muestras para los análisis de suelo.

Climatología: recolectar los datos de lluvias, temperatura y evaporación correspondientes a la mayor serie de años posible.

Agronomía: Cultivos a implantar después de la recuperación de los suelos, porque en función de ellos se elaboran los criterios de drenaje.

Otras herramientas valiosas son las fotografías aéreas del área afectada y los mapas de suelos, canales, el diseño de obras como alcantarillas, puentes, estaciones de bombeo, presupuesto, programa de obras e inversiones y el estudio económico.

MANEJO DE INSTALACIONES DE DRENAJE

El manejo de las instalaciones de drenaje consiste básicamente en labores de limpieza y mantenimiento de los canales y alcantarillas, aunque pueden incluirse manejo de compuertas y estaciones de bombeo.

Conservación de los canales

Los canales en tierra se deterioran fácilmente por erosión, sedimentación, propagación de vegetación, acción de las máquinas, ganado y el hombre. Por lo tanto, estas obras necesitan mantenimiento y reparaciones periódicas.

Los canales prediales suelen limpiarse a mano al inicio de la temporada de lluvias, para retirar los sedimentos y vegetación y reconstruir el cauce, aunque en nuestro medio es posible que se requieran varias limpiezas al año. La limpieza de los drenes colectores y canales de cierto tamaño exige hacerse por medios mecánicos, para lo cual se utilizan retroexcavadoras con baldes de sección rectangular alargados, para la limpieza y remoción de la vegetación y la reconstrucción de la sección de los canales.

La destrucción de la vegetación con herbicidas químicos es una alternativa de relativo bajo costo, pero exige una selección muy cuidadosa del herbicida a utilizar para minimizar los daños a la fauna acuática y los riesgos de contaminación del agua y sus recursos. Además, se deben determinar cuidadosamente las dosis y la época de aplicación.

EQUIPOS DE BOMBEO PARA DRENAJE

En drenaje agrícola se emplean dos tipos de bombas, dependiendo del caudal a evacuar:

1. Las bombas centrífugas de flujo radial-axial o de flujo mixto, llamadas también bombas de caudal, se emplean para caudales hasta de 25.000 lpm, con motores desde 20 HP hasta 100 HP. Estas bombas tienen la ventaja de ser utilizables también para riego por superficie.
2. Las bombas centrífugas de flujo axial son las más usadas en estaciones de bombeo para drenaje, donde se requiere evacuar grandes caudales a poca altura, generalmente en pocas horas. Estas bombas tienen requerimientos de potencia bastante menores que las bombas de flujo mixto.

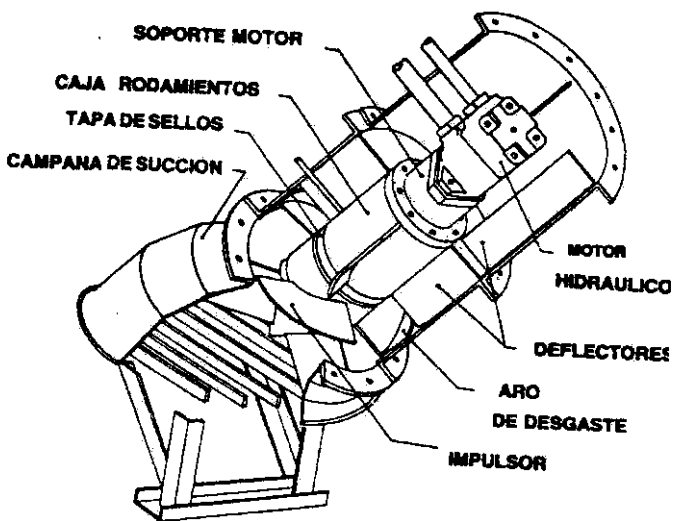


Figura 4. Diagrama de una bomba de flujo axial con motor hidráulico

BIBLIOGRAFIA

1. CASTILLA, A., 1985. Bombas y estaciones de bombeo. Notas de clase. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia.
2. ENCICLOPEDIA AGROPECUARIA TERRANOVA 1995. Drenaje agrícola. Tomo 5, Ingeniería y Agroindustria. Terranova Editores. Bogotá, Colombia.
3. GRASSI, C. J., 1969. Manual de drenaje agrícola. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, CIDIAT. Mérida, Venezuela.
4. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA 1986. Manual de Riego y Drenaje. Programa de Manejo de Aguas. Bogotá, Colombia.
5. PIZARRO, F., 1978. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Editorial Agrícola Española. Madrid, España.
6. TE CHOW V., 1960. Open-channel Hydraulics. McGraw-Hill Kogakusha. Tokyo, Japón.