

TP N 11

Drenaje agrícola.

Equipo docente:

Ing. Agr. Leopoldo J. Génova (Dr. M. Sc.), Profesor Titular Ordinario

Ing. Agr. Ricardo Andreau, Profesor Adjunto Ordinario

Ing. Agr. Marta Etcheverry, Jefe de Trabajos Prácticos Ordinario

Ing. Agr. Walter Chale, Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Pablo Etchevers Ayudante Diplomado Ordinario

Ing. Agr. Calvo Luciano Ayudante Alumno

El drenaje agrícola incluye un conjunto de conceptos, teorías, principios, metodologías y prácticas tendientes a prevenir las causas que originan los excesos hídricos y a combatirlos y controlarlos, cuando suceden.

Los efectos de la saturación de la capa arable son de tipo directos e indirectos, que en conjunto determinan procesos indeseables que ocurren en los sistemas agroproductivos y limitan su productividad y sostenibilidad.

Los efectos directos son los asociados a la disminución de la disponibilidad de oxígeno para los cultivos, que presentan distintas tolerancias a las situaciones de saturación, en términos de producción y supervivencia. En general, las plantas con raíces someras toleran unos pocos días el exceso hídrico (hortícolas, florales, aromáticas), los cultivos extensivos alrededor de una semana y los frutales y forestales, períodos mayores. Estos tiempos de tolerancia a la saturación deben tenerse en cuenta en el manejo de los excedentes hídricos, ya que el objetivo del drenaje es regularizar el régimen de humedad del suelo dentro de óptimos fisiológicos y económicos.

Los efectos indirectos más importantes son la limitación en el tránsito vehicular, la salinización y sodificación del suelo, la creación de condiciones favorables a las enfermedades y la alteración de la disponibilidad de nutrientes.

Los efectos sobre el tránsito de la maquinaria e implementos sobre los terrenos de cultivo, condicionan la calidad y oportunidad de labores agrícolas de preparación, protección y cosecha, y sobre las vías de comunicación limitan parcial o totalmente el transporte de servicios y productos.

El drenaje puede clasificarse desde varios puntos de vista. De acuerdo al régimen hídrico de la región geográfica, existirán problemáticas de excesos hídricos en zona húmedas y en zonas áridas, debidas a causas coincidentes o no.

Las situaciones de generalización del excedente de agua pueden categorizarse en inundaciones, anegamientos, empantanamientos, encharcamientos, pero en todos los casos ocurre la saturación de la capa arable.

En el **cuadro 1** se propone una clasificación de causas que determinan problemas de drenaje, que en principio podrán ser debidos a la ocurrencia única o consociada de una o varias fuentes de agua que origina el exceso y, de uno o varios obstáculos que impiden o retrasan el flujo de las corrientes líquidas superficiales, subsuperficiales o subterráneas.

Cuadro 1. Causas que originan problemas de drenaje.

	Por inundación y saturación de la capa arable.		Elevación de la capa freática.	
	Externas	Internas	Externas	Internas
Fuentes	1- Desbordamiento de ríos y arroyos.	1- Precipitación no escurrida ni percolada.	1- Escurrimientos subterráneos potentes cercanos a la superficie.	1- Precipitación percolada.
	2- Aportes por escurrimiento desde la periferia.	2- Escurrimientos de cola de surcos y melgas.	2- Filtraciones de los vasos de almacenamiento y de los grandes canales.	2- Subalimentación desde acuíferos semiconfinados.
	3- Ruptura de bordos de defensa.	3- Ruptura de canales.		3- Percolación de excesos de riego (ineficiencias de aplicación de láminas de riego).
				4- Filtración de la red de canales.
Obstáculos	1- Altos niveles del cuerpo receptor de aguas de drenaje.	1- Carencia de desniveles topográficos que limitan en escurrimiento superficial.	1- Condiciones geológicas desfavorables al escurrimiento subterráneo..	1- Subsuelo con baja conductividad hidráulica.
	2- Elevaciones del terreno. Altos topográficos..	2- Baja velocidad de infiltración de los suelos.		2- Altos niveles piezométricos de acuíferos semiconfinados.
	3- Obstrucciones en drenes principales y colectores.	3- Limitaciones en la descarga de la red de drenaje (desde drenes a colectores).		3- Obstrucciones en los drenes parcelarios y entubados.
	4- Obstrucciones al escurrimiento por terraplenes de rutas y FFCC.	4- Deficiente conservación de la red de drenaje.		

A su vez, tanto fuentes como obstáculos, pueden ser naturales o artificiales, internos o externos. Los de tipo artificiales, son los generados por la actividad antrópica y los internos o externos, se refieren a la localización de la fuente u obstáculo respecto de la localización geográfica del terreno saturado.

Las principales fuentes de agua son la precipitación no escurrida ni percolada, el desbordamiento de cursos naturales o artificiales, el ascenso del acuífero freático, las ineficiencias de los métodos de riego y la filtración de canales y embalses.

Los principales obstáculos son la baja velocidad de infiltración de los suelos, la baja conductividad hidráulica horizontal de los sedimentos, la presencia de capas impermeables, el escaso o nulo gradiente topográfico, la obstrucción de vías desagüe y drenaje, los terraplenes de vías de comunicación, los impedimentos en la descarga de aguas de drenaje en cuerpos receptores, el mantenimiento nulo o deficiente de cauces naturales o artificiales, el ascenso de niveles piezométricos de acuíferos profundos.

El análisis de las causas que originan la saturación de la capa arable es el punto de partida de cualquier diagnóstico y pronóstico para caracterizar la problemática de drenaje.

Luego de identificadas las causas, se deben jerarquizar, analizar su viabilidad técnica y económica y luego proceder a elaborar medidas preventivas y correctivas, siendo infinitamente más importantes todas aquellas que permitan morigerar o eliminar los excesos hídricos antes que ocurran.

El diagnóstico implica estudiar los acontecimientos en el campo real, observar y coleccionar datos de las variables que más contribuyen a la explicación del fenómeno: meteorológicas, climáticas, topográficas, geomorfológicas, hidrológicas, edáficas, agronómicas, económicas, físicas de infraestructura, sociales, etc., relacionarlos con información antecedente, para intentar obtener principios causa – efectos que permitan luego efectuar pronósticos. Actualmente las herramientas más potentes disponibles se basan en la utilización de modelos hidrológicos e hidráulicos, apoyados en información y modelos estadísticos, sistemas de información geográfica, modelización del terreno, interpretación de imágenes remotas.

Las problemáticas más comunes son las situaciones de inundación y anegamiento en zonas húmedas, principalmente originadas por precipitaciones en exceso y por obstáculos al flujo hídrico y en zonas áridas, el ascenso de la capa freática por ineficiencia de los riegos, filtración de la red de conducción y almacenaje e inexistencia, deficiencia y/o mal funcionamiento de las redes de drenaje.

2. Caracterización de la hidrodinámica freática.

En zonas húmedas con menor frecuencia y siempre en las zonas áridas, los movimientos de los niveles freáticos constituyen el principal estudio para diagnosticar y pronosticar fenómenos de saturación de capas arables.

Los estudios de la dinámica freática pueden ser de tipo areal y de tipo temporal. Ambos requieren el conocimiento de la profundidad del nivel freático, a partir de mediciones de la posición del nivel estático del agua subterránea en pozos de observación, construidos específicamente en pozos y perforaciones existentes, que permitan efectuar las mediciones (pozos de aljibes, molinos, perforaciones para captación de agua potables, de bebida de ganado, de riego, industriales, etc.).

Los estudios areales requieren una cobertura de la región a estudiar, con una densidad de observaciones adecuada, donde se pueda concentrar la medición de toda el área en uno a tres días, por lo menos mensualmente, quincenalmente si es posible, durante un período por lo menos anual, aunque lo más satisfactorio sería establecer una red de observaciones preferentemente permanentes.

Con esta información se elaboran mapas mensuales o cada quince días de igual profundidad freática (isohietas, isolíneas de nivel freático). Habiendo acotado las bocas de pozo, se transforman los datos de profundidad freática en cotas freáticas, permitiendo la construcción de isolíneas equipotenciales, isohipsas, isopiezas), que permiten mapear la situación energética (componente de presión hidrostática) del acuífero, con las cuales generar las líneas de flujo (posibles caminos del agua subterránea), e identificar zonas de recarga y descarga de la freática.

Los estudios temporales se efectúan midiendo en unos pocos pozos, los niveles freáticos, muy frecuentemente, por lo menos diariamente, idealmente en forma continua con el auxilio de freatígrafos o limnógrafos. Con esta información se generan gráficas y construyen modelos matemáticos que explican la dinámica freática continua o durante pasos de tiempo diarios u horarios, que permiten caracterizar los movimientos de los niveles freáticos y relacionarlos con factores causales (lluvia, riegos, filtraciones, características del perfil, de los sedimentos, de posibles obstáculos, etc.).

Del análisis de la información generada, surgirán las posibles medidas preventivas y correctivas para evitar, minimizar o controlar las situaciones de excesos hídricos. Por ejemplo, mejorar las condiciones de drenaje natural, favorecer el drenaje con acciones de mantenimiento de redes existentes, de construcción de nuevas redes, de mejoramiento de las eficiencias de riego, disminuir o impedir las filtraciones de canales, eliminar obstáculos, mejorar las condiciones de permeabilidad general, incorporar energías para incrementar la velocidad de los flujos, etc.

3. Requerimientos de drenaje.

En las zonas húmedas, el requerimiento de drenaje estará asociado principalmente al régimen de las precipitaciones y la ocurrencia de excesos, caracterizados por balances hídricos, incluyendo la tolerancia de las plantas a la permanencia de horizontes

superficiales saturados. El requerimiento de drenaje podrá elaborarse como una dotación de drenaje, refiriendo caudales continuos por unidad de superficie que es necesario evacuar para mantener la producción de los sistemas agropecuarios y forestales, la transitabilidad vehicular, la defensa de poblaciones a masas de inundación, etc.

Por ejemplo, para calcular la cantidad de agua a evacuar por desagüe o drenaje superficial cuando la precipitación en exceso que ocurre durante una tormenta, es de 30 mm y la tolerancia de las plantas es de 3 días, se opera de la siguiente forma, obteniendo el requerimiento o dotación de drenaje:

$$30 \text{ mm} = 300 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ a evacuar en 3 días} = 100 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{día} = 1,16 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

Para seleccionar los valores de lluvias, pueden tomarse láminas medias mensuales o más rigurosamente intensidades de precipitación consideradas como referencia (tormenta de diseño), asociada con un período de recurrencia (10, 12, 15 años) o una probabilidad. Generalmente, a nivel de cuenca hidrográfica, habrá que estimar un coeficiente de escurrimiento C_e , con métodos como por ejemplo el del número de curva CN, para calcular las fracciones de la precipitación que escurren e infiltran, ya que la lámina infiltrada recarga el acuífero freático y eleva su nivel, acercándolo a la superficie del terreno, pudiendo ser limitante de los cultivos por saturación del suelo en la zona de raíces.

El ascenso freático que determina la recarga puede calcularse mediante el conocimiento de la porosidad efectiva, porosidad eficaz, porosidad drenable o rendimiento específico de la freática, todos sinónimos que expresan el valor de $S = (W_s - W_c) / 100$, donde W_s y W_c son humedades volumétricas a saturación y a capacidad de campo, respectivamente. Puede tomarse $W_s = \% P$, donde $\% P$ es el porcentaje de porosidad:

$$\% P = 100 (\delta \text{ real} / \delta \text{ aparente}) / \delta \text{ real}$$

Supongamos que el nivel freático antes de la ocurrencia de una lluvia de 43 mm, es de 0,60 m. Si la cuenca (distrito de riego, campo, finca, lote) tiene un coeficiente de efectividad $C_e = 0,7$ la lluvia se particionará en una lámina escurrida $L_e = P_e * (1 - C_e)$ y una lámina infiltrada $L_i = P_e * C_e$, que reemplazando por el valor de C_e , da los siguientes valores ajustados a la décima:

Lámina escurrida = 13 mm

Lámina infiltrada = 30 mm.

El suelo que recibe la lluvia tiene los siguientes valores de contenidos hídricos referenciales, W_s o $\% P = 55 \%$, $W_c = 30 \%$ y $W_{act} = 28 \%$, que equivalen a 55, 30 y 28 mm por cada dm de profundidad del suelo, respectivamente.

La porosidad drenable será:

$$S = W_s - W_c = 55\% - 30\% = 25\% \text{ o mm/dm}$$

y

$W_c - W_{act} = 2 \%$ o 2 mm/dm quedarán retenidos en la zona insaturada, de 0,6 m de espesor. En total, 12 mm de los 30 mm infiltrados ponen al suelo en capacidad de campo y los 18 mm restantes filtrarán hasta alcanzar el nivel freático, elevándolo.

La elevación se calcula $E = 18 \text{ mm} / 25 \text{ mm/dm} = 0,72 \text{ dm} = 0,072 \text{ m}$, por lo que la nueva posición del nivel freático será de $0,6 \text{ m} - 0,072 \text{ m} = 0,528 \text{ m}$ desde la superficie, o sea una profundidad del nivel freático más cercano a superficie, consecuencia de la recarga por la lluvia percolada.

En realidad, para el cálculo del coeficiente de drenaje, deberá considerarse la precipitación en exceso que eleve la capa freática a niveles que comprometan la productividad de los sistemas agropecuarios y forestales.

En las zonas áridas, los componentes de mayor peso en la generación de ascensos freáticos son las ineficiencias de los métodos de riego y la filtración de canales y embalses. También el objetivo es hallar una dotación de drenaje, que explique la necesidad de evacuar un caudal continuo por unidad de superficie, asociado con la tolerancia de los cultivos al exceso hídrico.

Por ejemplo, si en un distrito de riego de 1.000 ha, la eficiencia de aplicación de riego es del 50 % y se entregan en cada riego, láminas brutas de 50 mm, con intervalos de 5 días, tiempo menor que la tolerancia de los cultivos al stress por exceso hídrico, la cantidad de agua a drenar es de 25 mm cada 5 días, o sea 5 mm / día. Este exceso de riego equivale a una dotación de $D_1 = 50 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{d} = 50.000 \text{ l} / \text{ha} \cdot \text{d} = 0,58 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$.

Por otro lado, la eficiencia de conducción de los canales de tierra es del 80 % y los canales conducen continuamente un caudal total de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que filtrarán $0,3 \text{ m}^3/\text{s} = 300 \text{ l/s}$, que para las 1.000 ha equivalen a una dotación $D_2 = 0,3 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$.

Sumando los dos componentes de pérdidas de agua en el distrito de riego, por ineficiencia en la aplicación del riego y en la conducción en los canales, la dotación o coeficiente de drenaje será de $0,88 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$.

4. Estimación del caudal que fluye en el medio poroso.

H. Darcy (1856) experimentó un modelo para explicar el flujo hídrico en suelos saturados e insaturados. Tiene validez para un rango de valores de S.

La velocidad del flujo de agua en el medio poroso (suelo y subsuelo, sedimentos superficiales, subsuperficiales y profundos) es una función de un parámetro que expresa las características del medio respecto de la capacidad de transmisión y de un gradiente hidráulico.

$$Q (\text{L}^3/\text{t}) = K (\text{L}/\text{t}) * A (\text{L}^2) * i \quad \text{donde}$$

Q = caudal (L^3/t), generalmente $\text{m}^3/\text{día}$

K = conductividad hidráulica (L/t) generalmente $\text{m}/\text{día}$

i = gradiente hidráulico, adimensional, diferencia de energía entre dos puntos, referido a la distancia que los separa.

$$i = \frac{hp_1 - hp_2}{L_{1-2}} = m/m \quad \text{donde}$$

hp_1 = altura de presión hidrostática o hidráulica en la posición 1, en m

hp_2 = altura de presión hidrostática o hidráulica en la posición 2, en m

L_{1-2} = distancia entre 1 y 2, en m

A menudo se utiliza el concepto de transmisividad $T = K * e$, donde

e = espesor de acuífero o zona saturada, en m

K = conductividad hidráulica (L/t) generalmente m/día

T = transmisividad, en m^2/s

El área donde fluye el agua subterránea, debe considerarse una sección hidráulica, o sea el plano perpendicular a la dirección de la corriente, por lo que sus componentes son el espesor de la zona saturada y el ancho que se considere unitario, 100 m, 10 km, etc.

Por ejemplo, un estrato saturado del subsuelo, de $K = 25$ m/día y 12 m de espesor, aguas arriba, el acuífero tiene una presión de 10,5 m y aguas abajo 8,5 m, estaciones distanciadas 10 km. Operando la ecuación de Darcy, se tiene para una franja de 100 m de ancho, que en esas condiciones, fluye un caudal de:

$$Q = 25 \text{ m/d} * 12 \text{ m} * 100 \text{ m} * [(10,5 \text{ m} - 8,5 \text{ m}) / 10.000 \text{ m}] =$$

$$Q = 6 \text{ m}^3/\text{d} = 0,069 \text{ l/s}$$

Valores de conductividad hidráulica orientativos:

MATERIAL SEDIMENTARIO	K (m/d)	K (cm/h)
Grava	7.200	
Arena gruesa	72	
Arena media	24	
Arena fina	0,72	
Limo		0,03
Arcilla		0,0003

5. Drenaje zonal.

El objeto de los estudios de drenaje a nivel zonal es el conocimiento de las causas que producen la elevación del nivel freático, el establecimiento de los orígenes de esas variaciones y su movimiento a través del área (recarga de un río, aguas subterráneas con altas cargas piezométricas), para definir cuáles áreas necesitarán de drenaje parcelario o cuáles sólo requerirán de la construcción de colectores.

5.1. Cartografía: Este aspecto es ampliamente desarrollado, ya que constituye el apoyo teórico particular sobre el trabajo a realizar en clase.

Dentro de la cartografía que se utiliza y construye en hidrología subterránea para la interpretación de las características de los acuíferos, pueden diferenciarse tres grupos temáticos principales: **cartografía física, cartografía hidroquímica y cartografía hidrodinámica.**

Los mapas del primer grupo se refieren a las características del medio en el cual el agua se infiltra y escurre subterráneamente: son los mapas hidrogeológicos, geológicos (de superficie y subsuelo), estructural, geomorfológico e isopáquico (igual espesor) entre otros.

Los mapas hidroquímicos reproducen las características especiales de la composición química del agua y sus variaciones. Los más difundidos son los de isoconas (igual salinidad), isocónicos (iguales contenidos en los iones principales: cloruros, bicarbonatos, sulfatos, calcio, magnesio, sodio, potasio), isorrelaciones iónicas (relaciones bicarbonatos/cloruros, calcio/magnesio, sulfatos/cloruros, índice de intercambio de bases) y utilitarios. Entre estos últimos se destacan en lo referente al riego, los de aptitud de agua para dicho uso: mapas de relaciones de adsorción de sodio (RAS), de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y carbonato de sodio residual (CSR), especialmente aptos para dimensionar las zonas de peligro de sodicidad a partir de las aguas de riego en contacto con los suelos agrícolas.

Se verá aquí especialmente la utilidad de los mapas hidrodinámicos, dentro de los cuales pueden mencionarse por su importancia:

- a. mapas de isoprofundidad.**
- b. mapas equipotenciales.**
- c. mapas de isovariabilidad.**

a. mapas de isoprofundidad: son en general de sencilla construcción, ya que representan isolíneas de igual profundidad del nivel de agua subterránea (freático o de acuíferos confinados). En hidrología agrícola tienen especial utilidad las cartas de isoprofundidad de los niveles freáticos, ya que ellos reflejan el impedimento que para ciertas labores pueden significar la proximidad de la capa freática. En el mismo sentido, para decidir entre distintos tipos de cultivo en relación a su afinidad con las aguas freáticas o de la zona capilar contigua. También son usados en proyectos de drenaje agrícola, como un elemento más para la selección de trazas adecuadas a los canales de desagüe o drenaje. Otra utilidad, esencialmente hidrológica, es que por indicar la profundidad de la capa freática bajo la superficie, implícitamente están refiriéndose al espesor de la capa no saturada, por lo cual son verdaderos mapas isopáquicos de esta zona, que es donde ocurre la estrecha relación agua – suelo – planta y donde sucede el fenómeno de infiltración. En el caso de los acuíferos confinados, también las cartas de isoprofundidad son muy importantes, porque permiten diseñar que tipo de bomba será necesario emplear en la captación, en función de la altura de aspiración necesaria.

b. mapas equipotenciales: son mapas con curvas de igual altura de los niveles de agua. Cuando se trata de una capa freática se llaman mapas isofreáticos y en el caso de acuíferos confinados, mapas isopiecícos (curvas isofreáticas e isopiecícas, respectivamente). Para su construcción se utiliza, además de la profundidad media en los pozos, la cota topográfica de los mismos. La altura que se va a representar surge de la resta de la cota topográfica menos la profundidad del nivel de agua, por lo cual su significado es de una altura sobre un plano de referencia y, de esta manera, puede visualizarse el sentido del movimiento de al agua subterráneas.

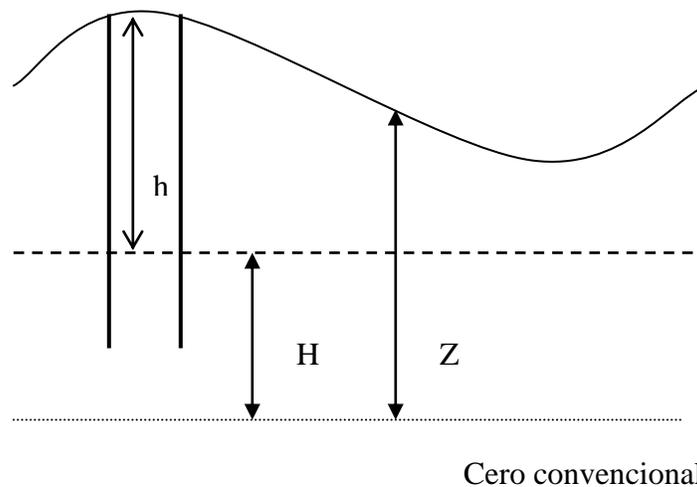
$$H = Z - h$$

siendo

Z = cota topográfica

h = profundidad del nivel freático

H = nivel freático.



La construcción es por interpolación entre puntos, no tanto con atención estricta sobre la precisión matemática, sino prestando cuidado a no cruzar cursos de agua permanentes mediante interpolación (ya que ellos resultan límites a la circulación en el caso de la capa freática) y, cuando se trabaja con una carta topográfica de base, atendiendo a la forma que las curvas de nivel adoptan, ya que de otra manera se corre el riesgo de reflejar falsos afloramientos de agua si se procede en forma puramente matemática.

Otro elemento geométrico que se incluye son las líneas de flujo o filetes de flujo, perpendiculares a las curvas que indican la dirección y el sentido del movimiento del agua subterránea. El conjunto de ambos (curvas y líneas) se denomina red de flujo o red equipotencial y de ella puede obtenerse:

1. zonas de recarga preferencial, conducción y descarga
2. sentido y dirección del escurrimiento subterráneo.
3. relación de las aguas subterráneas con los ríos, arroyos y canales.
4. gradiente hidráulico (diferencia de altura, medida a lo largo de una línea de flujo entre curvas, sobre la distancia que las separa).

5. velocidad de movimiento del agua calculada mediante la siguiente expresión, derivada de la Ley de Darcy

$$V_e = K * i / P_e$$

Donde:

V_e : velocidad efectiva.

K : coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica).

i : gradiente hidráulico

P_e : porosidad efectiva.

c. mapas de isovariabilidad: contienen curvas de igual variación de los niveles de agua subterránea (freático o piezométrico) para un determinado período. Son excelentes complementos de los otros dos mapas, especialmente para la agricultura, ya que permiten apreciar las variaciones en la profundidad de los niveles freáticos que, en el caso de cultivos bajo riego, poseen marcada importancia estacional en relación con el drenaje y con el peligro por salinidad o sodicidad de los suelos. Los mapas de isoprofundidad, que se construyen para un momento determinado, pueden actualizarse en base a estas cartas y, de la interpretación conjunta de ambos, surgen precisiones acerca de las zonas de recarga o descarga de los acuíferos, advertidas en los mapas equipotenciales. También posibilitan el cálculo de las reservas renovables de agua subterránea (reservas reguladoras), cuando incluyen un lapso prolongado de observaciones.

5.2. Diseño: Una red de drenaje zonal contempla la existencia de drenes de primer orden o troncales (de evacuación o salida) y de los de segundo orden o colectores. Para los primeros, su construcción es en forma de zanja exclusivamente, mientras que para los segundos, pueden ser a cielo abierto o entubados.

La ubicación de los drenes se condiciona a las partes más bajas del terreno, a los límites naturales, la red vial, límites catastrales, etc.

La utilización de las menores cotas y las pendientes máximas no erosivas aseguran un mínimo dimensionamiento de las redes y la posibilidad de evacuar por gravedad.

Las pendientes asignadas a las redes varían entre un máximo que permite el terreno y un mínimo que permite el gradiente hidráulico calculado. La obtención del perfil longitudinal se logra a través del levantamiento topográfico ordinario, y para el caso de la profundidad, ésta se condiciona a dos niveles normativos: normal cuando el sistema funciona bajo condiciones de descarga prolongadas y máximo, cuando el sistema de drenaje presenta descargas extremas de corta duración.

Usualmente se acepta el criterio de nivel normal para los drenes de segundo orden y el de nivel máximo para los de primer orden.

Las pendientes adoptadas para el cálculo deberán ser tales que permitan el menor movimiento de tierra y no descuiden, en la expresión de Chezy, su influencia sobre la velocidad y el radio hidráulico. El valor mínimo admisible sería de 0,0005 m/m aunque en zonas de muy escasa pendiente, puede ser aún menor. Las pendientes máximas están en el orden de 0,005 a 0,01 m/m, cuidando de no llegar a velocidades tan excesivas que comprometan la estabilidad de los taludes y obras de arte.

5.3. Espaciamiento (s)

Aquí se presentan 2 representativas de las dos condiciones siguientes.

- a) Flujo permanente: recarga=descarga o sea, la napa se mantiene estabilizada a una cierta profundidad permanente.
- b) Flujo no permanente: recarga ≠ descarga. Aquí la napa sufre variaciones con el tiempo.

a) Ecuación de Hoogdhout

Hoogdhout en 1936 propuso una solución para el cálculo del espaciamiento entre drenes. A partir de estudios hecho en climas húmedos arribo a una ecuación que se cumple bajo las condiciones:

- suelo homogéneos e isótropo.
- se cumple con Darcy y Dupuit-Forheimer (gradiente hidráulico).
- coeficiente de drenaje constante (Cd).
- drenes espaciados (s) y el hidroapoyo a profundidad (d) respecto a los drenes.

s: espaciamiento

K: conductividad hidráulica

d: altura de drenes respecto al hidroapoyo

$$s^2 = \frac{4 * K * (D^2 - d^2)}{c d} \quad \text{Hoogdhout (1940) Flujo horizontal}$$

Posteriormente esta ecuación fue escrita bajo la forma más conocida:

$$s^2 = \frac{4 * K * (b^2 + 2 * b * d)}{c d} \quad \text{Ecuación de la Elipse}$$

La ecuación es válida para valores de d de 1,5 a 3 metros, o sea que el hidroapoyo este próximo al dren.

Si se consideran 2 estratos, de conductividad hidráulica distinta, la ecuación queda:

$$s^2 = \frac{4 * k_1 * b^2 + 8 * k_2 * b * d}{c d}$$

Valido cuando los drenes están ubicados en la interface de las 2 estratos con K1 por arriba y k2 por debajo de los drenes respectivamente.

Espaciamiento

a-La ecuación de Hoogdout.

Concebida originalmente para flujo horizontal, fue modificada para considerar el flujo radial, el cual produce una resistencia adicional que queda evidenciado por el remplazo de “d” por un valor “de”, llamado estrato equivalente

$$s^2 \frac{4 \cdot K \cdot (b^2 + 2 \cdot b \cdot de)}{cd} \quad \text{Ecuación de elipse modificada}$$

Las condiciones de flujo son:

- Flujo predominante Horizontal: $d \leq b$
Regiones secas
Ecuaciones de la elipse
- Flujo predominante Radial: $d > s/4$
Ec. de elipse modificada
- Flujo radial y horizontal: $b < d < s/4$
- Ec. de elipse modificada

Determinación de los valores de “de”

$$de = \frac{d}{\left(2,55 \cdot \frac{d}{s} \cdot \ln \frac{d}{p}\right) + 1}$$

Donde:

- d: Profundidad de raíces
- s: espaciamento
- p: perímetro mojado

Tal como surge de la formula, “de” es función del espaciamento “s”, cuyo valor es precisamente la incógnita. Para resolver el problema se recurre a un procedimiento iterativo: se le asigna arbitrariamente un valor a “s”; se calcula “de”; con ese valor de “de” se calcula “s” usando la ecuación de elipse modificada; si valor de “s” calculado coincide con el inicialmente propuesto, significa que se arribo al resultado; si no, se cambia el “s”, repitiendo la operación hasta que la diferencia no sea significativa.

Ejemplo:

Suelo arcilloso, con K 0,9 m/día

Cd: 0,012 m/día

b: 0,50 m

d: 10 m

drenes: Tubos de Θ : 10 cm.

Calculo del perímetro mojado (p):

Circunferencia del tubo = $2*\pi*r = 0,31$ m

Considerando funcionamiento semilleno, p = 0,15 m.

Calculo de espaciamento (s):

1- Se conviene un s de= 20 m.

2- Se calcula “de”

$$de = \frac{10}{2,55 * \frac{10}{20} + \ln \frac{10}{0,15} + 1} = 1,5m$$

3- Calculo de “s”:

$$s = \sqrt{\frac{4 * 0,9 * (0,5^2 + 2 * 0,5 * 1,5)}{0.012}} = 23m$$

4- Segundo calculo de “de”:

$$de = \frac{10}{2,55 * \frac{10}{23} + \ln \frac{10}{0,15} + 1} = 1,6m$$

5- Segundo calculo de “s”:

$$s = \sqrt{\frac{4 * 0,9 * (0,5^2 + 2 * 0,5 * 1,6)}{0.012}} = 23,55m$$

Dado que la variación de “s” entre 1° y 2° calculo no es significativo, se acepta el espaciamento definitivo de 23 metros, con estrato equivalente de 1,6 metros.

b- Ecuación de Glover-Dumm

Desarrollada para zonas tropicales con precipitaciones intensas y duración variable, o bien para regiones semiáridas con riego periódico, donde la recarga y la descarga no son uniformes.

El principio de la ecuación es el rebatimiento de la napa a partir de la recarga, en un tiempo (t), que depende de la tolerancia del cultivo, de las propiedades del suelo (K, α ,d) y del espaciamento “s”.

$$S^2 = \frac{\pi^2 * K * d * t}{\alpha * \ln * (1,16 * \frac{h_0}{ht})} \text{ Glover-Dumm (1954, flujo horizontal)}$$

En la ecuación figuran los términos:

- ho: altura inicial de la napa al recibir la recarga (m).
- ht: altura final de la napa luego de un tiempo “t” (m).
- t: tiempo de descenso de la napa (días).
- α : porosidad drenable (rendimiento específico).

Cuando hay flujo horizontal y radial, se reemplaza “d” por el estrato equivalente “de”.

$$S^2 = \frac{\pi^2 * K * d_e * t}{\alpha * \ln * (1,16 * \frac{h_0}{ht})} \text{ Glover-Dumm modificada}$$

Otro modo de llevar el flujo radial a horizontal es aplicando el Método de Van Beers:

- 1° Se calcula “s” como si solo existiera flujo horizontal (s_0)
- 2° se calcula la corrección “C”

$$C = d * \ln \left(\frac{d}{p} \right) \quad \text{donde. P= perímetro mojado del dren}$$

- 3° se calcula el espaciamiento corregido (s):

$$S = s_0 - C$$

Ejemplo.

Sea un cultivo de soja, con profundidad de raíces de 0,6 m, una precipitación de 90 mm y una efectividad del 50 %.

Datos del suelo: K: 1,3 m/día

Porosidad drenable: 11 %

Prof. Hidroapoyo: 2,30 m

Datos de diseño: prof. De drenes (a): 1,2 m

B=ht=0,6 m

Precip. efectiva= 90 * 0,5 = 45 mm

Ascenso de la napa por precip. (ΔH)

$$\Delta H = \frac{L}{\alpha} = \frac{45 \text{ mm}}{0,11} = 409 \text{ mm} \approx 41 \text{ cm.}$$

Altura de la napa al recibir recarga por pp. (h_0):

$$h_0 = 0,6 \text{ m} + 0,41 \text{ m} = 1,01 \text{ m}$$

Altura de drenes respecto a hidroapoyo (d):

$$d = 2,3 \text{ m} - 1,2 \text{ m} = 1,10 \text{ m}$$

Espaciamiento, considerando solo flujo horizontal (s_0)

$$s_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 * 1,3 * 1,1 * 3}{0,11 * \ln\left(1,16 * \frac{1,01}{0,6}\right)}} = 24 \text{ m} \quad \text{t sale de cuadro}$$

Inclusión del flujo radial para llevarlo a horizontal (Van Beers).

$$c = d * \ln \frac{d}{p} = 1,1 * \ln \frac{1,1}{0,12} = 2,43 \text{ m}$$

$$s = s_0 - C = 24 - 2,4 = 21,6 \text{ m} \approx 22 \text{ m}$$

Dimensionamiento de Tubos

Los parámetros a definir son el caudal a transportar y el diámetro de los tubos. Otros parámetros, como la pendiente y la longitud, están definidos por las dimensiones y topografía de la parcela; como valores orientativos podría nombrarse pendientes de 0,3 % y longitudes de 150 – 200 m.

a-Caudal

Surge del coeficiente de drenaje (CD) y el tiempo (t que puede tolerar el cultivo sin disminuir significativamente se producción.

Ejemplo:

Sea una pp. de 47 mm con un t= 3 días, drenes espaciados 14 m. con una longitud L= 150 m.

$$\text{Coeficiente de drenaje} = \frac{47 \text{ mm}}{3} = 16 \text{ mm/día}$$

Área de influencia de cada dren (A):

$$A = L * s = 150 \text{ m} * 14 \text{ m} = 2100 \text{ m}^2$$

Caudal a drenar por cada dren (Q)

$$Q = 2100 \text{ m}^2 * 0,016 \text{ m/día} = 33,6 \text{ m}^3/\text{día} = 0,39 \text{ l/seg.}$$

b- Diámetro

Se usa la formula de Manning y la tabla 4 para obtener “k”

Sección de descarga (h/ Θ)	k
------------------------------------	---

c50%	0,156
60%	0,200
70%	0,244
80%	0,284
90%	0,315
95% (caudal máx.)	0,324
100%	0,311

Cuadro 4: dimensionamiento de conductos circulares parcialmente llenos (fuente: Cruciani, 1980)

$$\Theta = \left(\frac{Q * n}{k * \sqrt{I}} \right)^{0,375}$$

Siguiendo on el ejemplo anterior, para una relación h/d = 60 % y I = 0,3 %

$$\Theta = \left(\frac{0,00039 * 0,017}{0,2 * \sqrt{0,003}} \right)^{0,375} = 6 \text{ cm}$$

5.4. Ejemplo de aplicación: Se trata de un ejercicio simplificado de construcción e interpretación de un mapa isofreático en una cuenca hipotética. Los pasos a seguir son:

- Cálculo de las alturas freáticas.
- Vuelco de los valores al mapa.
- Interpolación entre puntos con atención al esquema fluvial.
- Trazado de las líneas de flujo.
- Interpretación de la red obtenida y cálculo del gradiente hidráulico.
- Estimación de la velocidad efectiva, en base a valores de conductividad hidráulica (K) y porosidad efectiva (Pe) dados en clase.
- Trazado de curvas de isoprofundidad.

6. Ejercicios

1. En un establecimiento de 500 ha netas de riego, se cultivan 200 ha de hortalizas por surco y 300 ha de alfalfa por melgas, con eficiencias de aplicación del 50% y 60 %, respectivamente. Los sistemas de riego son alimentados por un canal (el canal 1 abastece las 200 ha de surcos y el canal 2 abastece las 300 ha de melgas) y ambos reciben en la toma el caudal total requerido, que deberá estimarse con los siguientes datos: Eto enero 12 mm / día, eficiencia de conducción de los canales 1 y 2 = 80 %; Kc hortalizas = 0,9 y Kc alfalfa = 1,44. Como es necesario diseñar un dren colector, se requiere estimar la dotación o requerimiento de drenaje para captar los excedentes hídricos generados en la conducción y aplicación del agua.

*Se solicitan dos respuestas: el caudal continuo total demandado en la toma, en m³/seg. y la dotación de drenaje en l/seg.

Sup = 500 Ha —» hortalizas: 200ha
riego por surcos con eficiencia de aplicación. = 50%
eficiencia de conducción: 80 %
—» alfalfa: 300ha :
riego por melgas con eficiencia de aplicación = 60%
eficiencia de conducción: 80 %

2. En una cuenca precipitan 120 mm de lluvia durante 10 hs, siendo el coeficiente zonal de precipitación efectiva de 0,87.

El perfil del suelo considerado homogéneo, de densidad aparente 1,33 g/cm³ tiene en el momento de ocurrida la lluvia una humedad actual del 28 % en peso y sus valores referenciales son:

W_{sat} = 56% (en peso) W_{cc} = 31 % (en peso) W_m = 17 % (en peso)

Los freátímetros del área registran antes de comenzar a llover 80 cm. de profundidad freática.

Indique si la recarga ocurrida, modifica la posición freática y de ser así, consigne la nueva profundidad del acuífero.

3. En una cuenca de 5.200 ha se desea conocer la precipitación ocurrida en una Estación Agro meteorológica. Se verifico una profundidad freática de 60 cm. antes de la lluvia y de 40 cm. después de la misma.

El coeficiente zonal para obtener la precipitación efectiva es de 0,87, para la tormenta ocurrida.

Los contenidos hídricos referenciales son:

W_{sat} = 56%; W_c = 32%; W_m = 16% W_{act} = 20% (datos en peso)

La densidad aparente del suelo (considerando un perfil homogéneo hasta 2 m de prof.) se determino a campo, con el método del cilindro de 50 cm³, cuando la muestra del suelo húmedo peso 79,2 g y de suelo seco 60 g.

4. Calcular el coeficiente de drenaje (CD) cuando se aplico una lamina neta de 100mm, con una eficiencia de riego de 40 % en el mes de Enero.

a- 4,5 mm/día b- 5,6 l/s.ha c- 50 m³/día
d- 0,00056 m³/s.ha e- 0,0048 mm/día f- 0,0048 m³/s.ha

Lámina bruta (mm) = Lámina neta (mm) / Eficiencia

Lámina bruta (mm) = 100 mm / 0,40 = 250 mm

Lámina bruta (mm) = 250 mm

5. En una región se cuenta con un relevamiento freático completo. Se seleccionaron dos pozos de observación, distantes 12 Km. entre si.

El pozo A, cuyo brocal tiene una cota 105m, presenta una profundidad freática de 6m. El pozo B, de cota 98 m, acusa 7,9 m de profundidad freática.

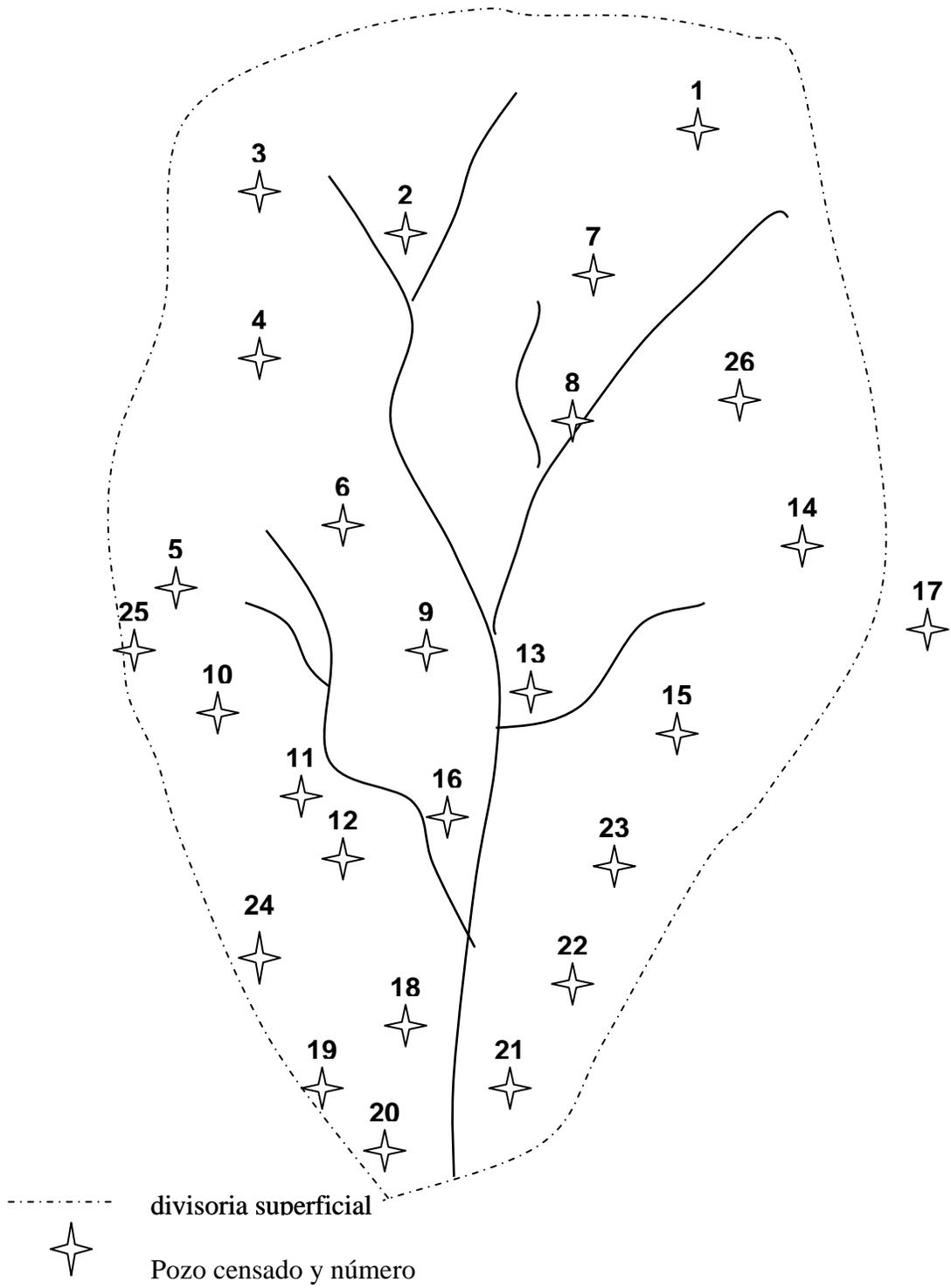
Se conoce la transmisividad $T = 1,5 \text{ m}^2/\text{día}$ y el $K = 0,5 \text{ m/día}$.

Calcular el caudal en l/s que circula entre ambos puntos, indicando la dirección del flujo.

6. Considerando un suelo cuya humedad actual es de 13% p/p, $W_c = 33\% \text{ p/p}$, $W_{sat} = 45\% \text{ p/p}$, $D_{ap} = 1,32 \text{ gr. /cm}^3$ y la profundidad freática 1 m. cuál será el ascenso freático si se produce una precipitación efectiva de 210 mm?

Ejemplo de aplicación: construcción de un mapa isofreático.

Pozo	Cota topográfica (m)	Nivel freático (m)	Nivel estático (m)
1	61,0	36,7	24,3
2	50,8	25,7	25,1
3	60,2	31,3	28,9
4	58,3	33,3	25,0
5	52,5	27,6	24,9
6	50,3	30,3	20,0
7	54,7	30,6	24,1
8	43,4	24,6	18,8
9	40,0	23,0	17,0
10	46,1	26,4	19,7
11	36,2	20,2	16,0
12	31,8	17,7	14,1
13	41,5	26,5	15,0
14	42,9	25,4	17,5
15	32,3	19,4	12,9
16	20,4	7,8	12,6
17	41,6	26,6	15,0
18	7,0	2,0	5,0
19	16,2	8,6	7,6
20	6,8	2,0	4,8
21	8,1	3,6	4,5
22	9,5	3,9	5,6
23	10,0	2,1	7,9
24	34,0	19,0	15,0
25	47,2	24,7	22,5
26	53,4	33,9	19,5



7. Bibliografía

Cabral, M, J Ceci y L Genova. 1993-1995. estudios del riesgo hidrico en los partidos de 25 de Mayo, Saladillo, R. Perez y Gral. Belgrano, Pcia. de Buenos Aires. UNDP. CODESA.

De la Peña, 1981. Principios y solucion de drenaje parcelario Bol. Tec. 15. UACH. Chipingo.

Dieleman, F. y B. Trafford. 1976. Ensayos de drenaje. Est. FAO Rego y Drenaje N°28 Roma.

International Institute for land Reclamation and Improvent. 1973. Drainaje: principles and applications Waggeningen.

Luque, J.A. et al. 1991. Drenaje agricola y desgue de areas inundadas. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires.

Luthin, J. 1984. Drenaje de tierras agricolas. Ed. Limusa. Mexico.

Palacios Velez, O. 1983. Algunos problemas de drenaje y ensalitramiento de tierras agricolas. Colegio de Postgraduados. Chapingo. Mexico.

Pizarro, F. 1978. Drenaje agricola y recuperacion de suelos salinos. Ed. Agricola Española. Madrid.

Richards. L. Editor. US Salinity Lab. Staff. 1977. Diagnostico y rehabilitacion de suelos salinos y sodicos. Ed. Limusa. Mexico.

Segundo Curso Nacional de Drenaje de Tierras Agricolas. 1989. convenio Peru- Holanda. CENDRET- Waggeningen. Universidad Agraria La Molina. Lima.

USDA. 1991. soil conservation Service. National Engineering. Handbook. Section 16: Drainage of Agricultural land. USDA. Washington.

Van Schilfgaarde, J. (ed). 1984. Drainage for agriculture. Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin.