

FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA HACIA LOS DRENES

1.- INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Cuando el agua de riego y el agua de lluvia que se distribuye sobre el terreno se prolonga durante largos períodos, el agua en exceso puede acumularse en la superficie del suelo, trayendo como consecuencia el **encharcamiento**. Para eliminar el agua encharcada de la superficie del terreno, se aplica el **drenaje superficial**.

Parte del agua de riego o de lluvia que se infiltra en el suelo quedará almacenada en los poros y será utilizada por los cultivos y otra parte, se perderá por percolación profunda originando la elevación del nivel freático. Cuando el nivel freático alcanza la zona radicular, las plantas pueden sufrir daños debido al **anegamiento**. Para eliminar el agua en exceso de la zona radicular y las sales disueltas del suelo se utiliza el **drenaje subterráneo**, que permite el flujo de agua freática hacia los drenes.

En muchos proyectos de irrigación debido al anegamiento y salinización de los suelos, se obtiene rendimientos muy bajos de los cultivos, trayendo como consecuencia en muchos casos, el abandono de tierras por la pérdida de toda la producción. Según información consignada de la FAO, entre el 10 al 15 % de los 25 millones de has bajo riego en el mundo, están afectadas por el anegamiento y la salinización.

Según el Estudio del Perfil Ambiental del Perú, realizado por la ex Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN), la costa peruana tiene 775,431 has de superficie cultivada, de las cuales alrededor de 306,701 has (40 %) se encuentran afectadas por problemas de salinidad, situación que generalmente es consecuencia del mal manejo de recursos hídricos e íntimamente relacionado con problemas de drenaje.

Para la solución de los problemas de encharcamiento en la superficie del terreno, anegamiento del suelo y para evitar la salinización se utiliza el **drenaje agrícola**, que es la eliminación del exceso de agua y de sales disueltas en las capas superficiales y subterráneas del terreno por medios artificiales, de tal forma que permita prevenir la salinización de los suelos y los efectos negativos de humedad excesiva en la zona radicular de los cultivos.

Como se comprende, el drenaje agrícola es uno de los rubros mas importantes que debe de tenerse en cuenta en la mayoría de las zonas bajas de los valles de la costa peruana o llanuras de la sierra y selva con problemas de salinidad, el cual se debe implementar o complementar en un área de riego actualmente en desarrollo o en proyectos de irrigación.

El drenaje agrícola es una práctica antigua, aplicándose como generalmente como único medio las zanjas abiertas para el control de la napa freática y la acumulación excesiva del agua de la superficie del terreno por encharcamiento. El desarrollo de esta metodología fue acompañado por los conocimientos crecientes de los principios de drenaje, desde experiencias y pericias, hasta una ciencia basada en las interrelaciones complejas entre las condiciones hidrológicas, hidrogeológicas y agronómicas.

En este sentido, uno de los aspectos mas importantes de competencia de la Ingeniería Agrícola y profesiones afines, es el conocimiento del diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de riego y drenaje.

El marco del desarrollo del presente Capítulo es el drenaje subterráneo, donde se plantean los principios y la aplicación de las ecuaciones que generalmente se utilizan para describir el flujo subsuperficial de agua en un sistema de drenes paralelos abiertos o tuberías, en condiciones de régimen permanente y variable.

1.2 OBJETIVO DEL DRENAJE SUBTERRÁNEO

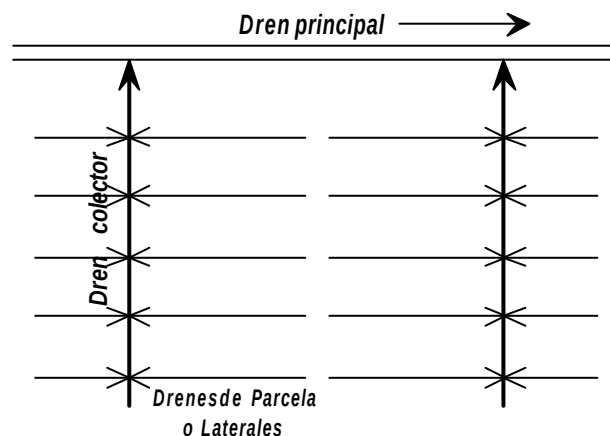
El objetivo del drenaje subterráneo es controlar la capa freática. Para ello se elimina el agua infiltrada procedente de la lluvia, riego u otros orígenes, de forma que en la zona radicular permita el desarrollo de los cultivos.

2.- SISTEMAS DE DRENAJE SUBTERRANEO

2.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE DRENAJE

Un sistema de drenaje está constituido por tres componentes:

- Un **sistema de drenaje parcelario**, que impide el encharcamiento del terreno y/o regula el nivel freático. Está constituido por drenes de parcela o laterales.
- Una **red principal de drenaje**, que trasporta el agua fuera del área agrícola. Está constituido por drenes colectores y/o principales.
- Una **salida**, que es el punto por lo que el agua drenada desagua fuera de la zona.



La función de los drenes colectores, es recoger el agua de los drenes de parcela y transportarlas a los drenes principales. Los drenes principales tienen la función de transportar el agua fuera de la zona.

Es importante destacar que no siempre hay una distinción clara de las funciones de los drenes, porque los drenes colectores y de parcela tienen una misión de transporte, y todos los drenes colectores y principales también controlan en parte la profundidad del agua freática.

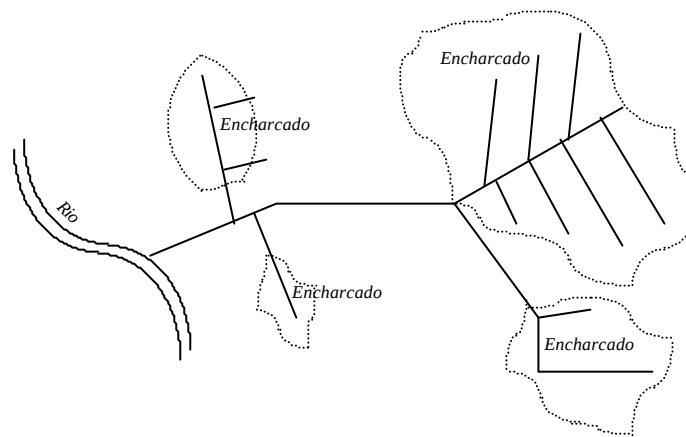
Cuando los drenes de parcela son tubos enterrados y todos ellos descargan a un dren colector abierto, se denomina **sistema de drenaje singular**.

Cuando los drenes de parcela y los drenes colectores son tubos enterrados, se denomina **sistema de drenaje compuesto**.

En sistemas de distribución regular, los trazados de tipos de sistemas regulares tipo rejilla (laterales perpendiculares al colector) o del tipo de espina de pescado (laterales que forman ángulos agudos con el colector), son apropiados en parcelas bastante homogéneas con necesidades de drenaje mas o menos uniforme.

Para drenar zonas húmedas aisladas o captar manantiales, pueden ser instalados sistemas de trazado irregular o el azar, se puede emplear combinación de tipos

Las circunstancias locales determinan el sistema apropiado.



Los factores que influyen en la capa de agua freática son:

- La precipitación y otras fuentes de recarga.
- La evaporación y las descargas de otro origen.
- Las propiedades de los suelos.
- La profundidad y el espaciamiento de los drenes.
- La superficie de la sección transversal de los drenes.
- El nivel del agua en los drenes.

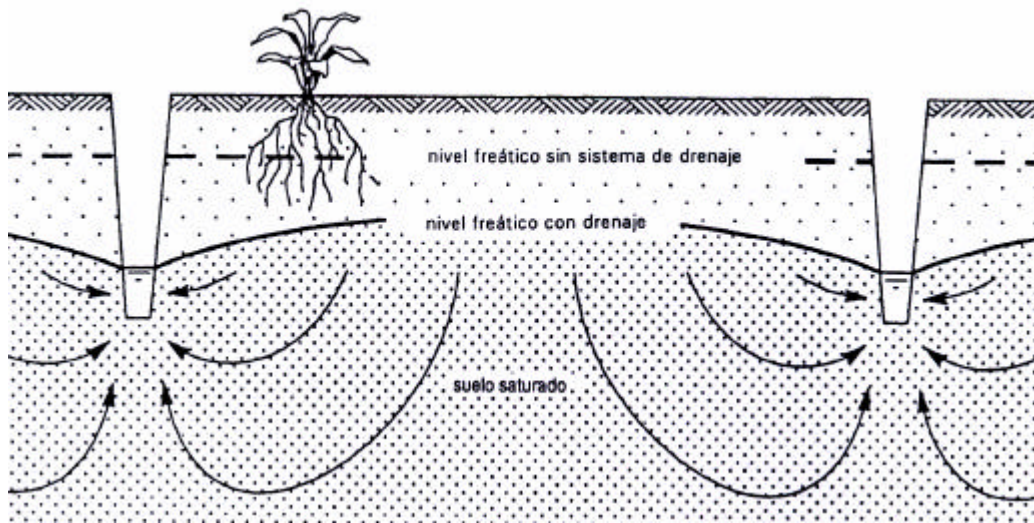
Este tema, se enmarca en los sistemas de drenaje parcelario.

2.2 TIPOS DE DRENES DE UN SISTEMA DE DRENAJE

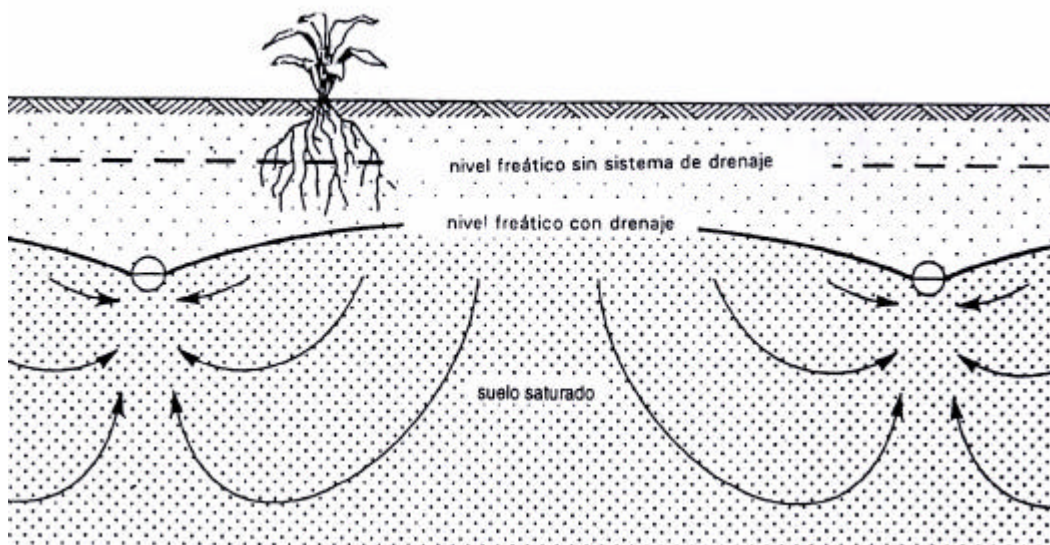
Un sistema de drenaje, puede estar constituido por un sistema de drenes abiertos y/o sistema de drenes de tubería enterrada.

Un sistema de drenes abiertos tiene la ventaja de que también pueden recibir la escorrentía superficial (drenaje superficial), pero tiene como principales inconvenientes la pérdida de terrenos para el cultivo, interferencia con los sistemas de riego, división del terreno en pequeñas parcelas que dificulta las labores agrícolas; así mismo el costo de mantenimiento.

La principal limitación de un sistema de drenaje con tuberías es indudablemente el económico por los altos costos de instalación.



Drenes abiertos



Drenes de tubería

2.3 PROFUNDIDAD DE LA CAPA FREÁTICA PARA CADA CULTIVO

Desde un punto de vista técnico, la profundidad óptima de la napa freática es la que no ocasiona disminución en la producción de los cultivos. En muchos casos esta profundidad es antieconómica para la instalación de un sistema de drenaje y se prefiere que los rendimientos de los cultivos no alcancen el máximo a cambio de lograr un menor costo de las obras de drenaje. En este sentido, la profundidad óptima es la que origina una mayor relación beneficio/costo. A continuación a nivel de referencia, se presenta la profundidad de las raíces de los cultivos mas usuales:

Profundidad de las raíces (cm)

Cultivo	Zona de ramificación densa	Zona de ramificación moderada	Profundidad extrema
Trigo	30	30-90	120-150
Centeno	50	50-75	150-225
Avena	50	50-75	120-150
Cebada	70	70-100	140-150
Maíz	70	70-140	150-180
Sorgo	65		
Lino	40	40-60	75
Algodón	70	120	
Girasol	30	30-90	275
Remolacha azucarera	30	30-120	150-180
Caña de azúcar	70		
Alfalfa	90	90-180	180-275
Trébol	90		120-245
Zanahoria	90		150
Cebolla	60	60-90	90-230
Col	60	60-90	90-230
Coliflor	30-50	50-90	90-140
Lechuga	20-30	30-120	230
Tomate	60	60-90	120
Pimiento	30-45	45-90	120
Melón	20-30	30-90	90-120
Judías	30	30-75	90
Guisantes	30	30-75	90
Rábanos	15		60
Espinacas	25	35-60	105
Patatas	25-30	30-100	100
Fresas	30		90
Melocotón	90		
Manzano	100		
Agrios	75		
Vid	75		
Olivo	100		

La mayoría de pastos desarrollan un sistema radicular superficial, lo cual hace tolerantes a niveles freáticos elevados. Sin embargo, a manera de orientación se recomienda las siguientes profundidades freáticas: suelos de textura fina entre 60 y 80 cm y suelos arenosos, entre 40 y 60 cm. Los tréboles necesitan profundidades de 70 a 90 cm.

En el caso de hortalizas se recomiendan las profundidades: Lechuga, fresas: 40-50 cm; cebolla, guisantes, zanahoria, col: 60 cm; judías, pimientos: 70-80 cm.

Con relación a los cultivos extensivos usuales se presentan las producciones de varios cultivos en relación con la profundidad del nivel freático:

Producción relativa (%) para diferentes profundidades del nivel freático (cm)

(Van Hoorn. 1958)

Cultivo	Granos, raíces y tubérculos				
	profundidades del nivel freático (cm)				
	40	60	90	120	150
Trigo	58	77	89	95	100
Cebada	58	80	89	95	100
Avena	49	74	85	99	100
Rem.Azucarera	71	84	92	97	100
Papa	90	100	95	92	96

Para el maíz se recomienda una profundidad de 80 a 100 cm. La papa se desarrolla bien con profundidades de la napa freática de 40 a 50 cm.

3. FORMULAS DE DRENAJE

Darcy y Dupuit en el siglo XIX, fueron los primeros en formular las ecuaciones básicas para el flujo subsuperficial de agua a través de medios porosos y aplicarla en pozos. Rothe a principios del siglo XX, aplicó estas ecuaciones a flujo subsuperficial hacia los drenes, deduciendo así la primera formula de drenaje. Hooghoudt, en los años treinta dio un estímulo real a un análisis racional del problema del drenaje, estudiándola en el contexto del sistema agua-suelo-planta.

Desde ese entonces, científicos de todo el mundo como Childs en Inglaterra, Donnan, Luthin y Kirkham en los Estados Unidos y Ernst y Wesseling en Holanda, han contribuido hacia un perfeccionamiento adicional de este análisis racional.

Los factores anteriormente mencionados, se interrelacionan por ecuaciones de drenaje que se basan en dos suposiciones:

- Flujo bidimensional, es decir el flujo es el mismo en cualquier sección transversal perpendicular a los drenes.
- Distribución uniforme de la recarga permanente o variable, sobre el área comprendida entre los drenes.

La mayoría de las ecuaciones que se presentan, se basan además en las suposiciones de Dupuit-Forchheimer, por lo que tienen que considerarse únicamente como soluciones aproximadas. Sin embargo, estas soluciones aproximadas tienen por lo general tan alto grado de exactitud, que se justifica completamente su aplicación en la práctica.

Estas formulas se emplean fundamentalmente para el dimensionamiento de los sistemas de drenaje, ya que relacionan algunas características de diseño (espaciamiento y profundidad) con ciertas características de los suelos, clima, etc. Estas ultimas características son: Conductividad hidráulica (K), espesor de los estratos, espacio poroso drenable o macroporosidad (μ), profundidad optima de la capa freática o velocidad de descenso de la misma y caudal procedente de la lluvia, riego u otros orígenes.

Las formulas de drenaje, se pueden agrupar en las dos clases siguientes:

- Formulas de régimen permanente
- Formulas de régimen variable o transitorio.

Las formulas para régimen permanente, se deducen basándose en la suposición de que la intensidad de la recarga es igual al caudal de descarga de los drenes y que consecuentemente, la capa de agua freática permanece en la misma posición.

Las ecuaciones de drenaje para régimen variable, consideran las fluctuaciones de la capa de agua con el tiempo, bajo la influencia de una recarga variable.

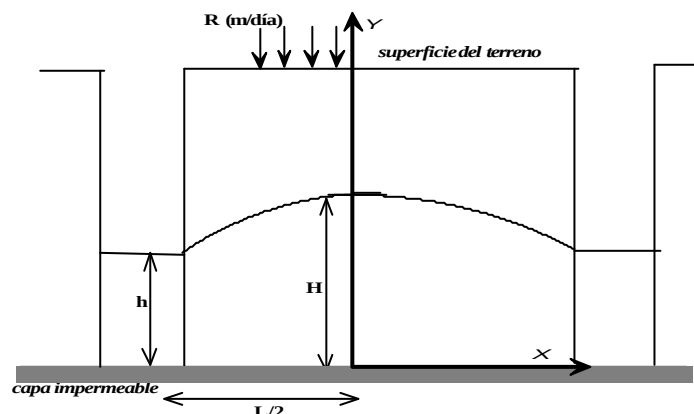
4. ECUACIONES DE DRENAJE PARA REGIMEN PERMANENTE

En las ecuaciones de drenaje de régimen permanente, se supone que la capa freática se encuentra estabilizada: la cantidad de agua que la alimenta es igual a la eliminada por los drenes.

Tal situación correspondería al caso de una lluvia constante durante un largo periodo de tiempo. En la práctica no se da esta situación, pero sin embargo, la aplicación de las correspondientes formulas suelen dar resultados aceptables en regiones de régimen pluviométrico caracterizado por la regularidad de las precipitaciones y por su baja intensidad.

4.1 FLUJO PERMANENTE DEL AGUA SUBTERRÁNEA CON RECARGA UNIFORME HACIA ZANJAS QUE LLEGAN HASTA UNA CAPA IMPERMEABLE

Esta situación es típica para el drenaje en su caso mas simplificado, cuando la conductividad hidráulica en cualquier parte del perfil suelo es la misma y los drenes alcanzan la capa impermeable.



Aplicando la Ley de Darcy:
$$-Ky \frac{dy}{dx} = q_x \quad (1)$$

Teniendo también $q_x = Rx$ y aplicando las condiciones límite: $x=0$, $x=L/2$ e $y=H$, $y=h$

Integrando:

$$-K \int_{y=H}^{y=h} y dy = R \int_{x=0}^{x=L/2} x dx$$

$$-\frac{1}{2}K(h^2 - H^2) = \frac{1}{2}R\left(\frac{L}{2}\right)^2$$

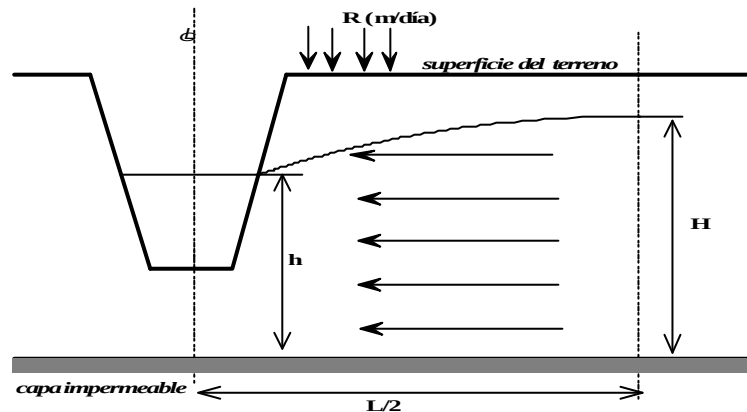
De donde:

$$L^2 = \frac{4K(H^2 - h^2)}{R} \quad (2)$$

Esta formula es conocida como la ecuación de la elipse y en relación con el calculo de espaciamiento de drenes, es mas conocida como la formula de Donnan.

4.2 FORMULA DE DONNAN

Anteriormente se ha demostrado que con la llamada ecuación de Donnan (Donnan, 1946), se puede describir el flujo de agua hacia zanjas verticales, basándose en las suposiciones de flujo horizontal unidimensional, es decir, líneas de corriente horizontales y paralelas:



Parámetros de la fórmula de Donnan

$$R = q = \frac{4K(H^2 - h^2)}{L^2} \quad (3)$$

donde:

q = descarga de los drenes por unidad de superficie (m/día)

R = recarga por unidad de superficie (m/día).

L = espaciamiento de drenes (m).

K = conductividad hidráulica del suelo (m/día)

H = distancia de la napa freática en el punto medio entre los drenes hasta la capa impermeable (m).

h = distancia desde la superficie del agua en la zanja o el tubo de drenaje hasta la capa impermeable (m).

Como se comprende, la formula mas sencilla para el calculo del espaciamiento de drenes es la de Donnan cuyos puntos de partida son:

- El flujo hacia los drenes es permanente. Esto quiere decir que la cantidad de agua que alimenta la napa freática en forma constante, es la misma que fluye hacia los drenes y sale por ellos sin variaciones en el tiempo.
- El flujo solamente es horizontal.
- El suelo es homogéneo hasta la capa impermeable.
- Hay un sistema de drenes paralelos infinito en ambas direcciones.
- La recarga es homogéneamente distribuida.

De los estudios de campo, se obtiene la conductividad hidráulica del suelo y la profundidad de la capa impermeable. Las normas de drenaje, dan la profundidad de la napa freática en el punto medio entre los drenes y la descarga de drenaje “R”. “H” se obtiene de las informaciones de campo y normas de drenaje. “h” en cambio, aunque esta limitado por la profundidad de la capa impermeable y en cierta forma por las normas de drenaje, depende generalmente de las condiciones de diseño del sistema, como niveles de los drenes troncales, pendientes necesarias, condiciones de construcción, etc.

La formula será por lo tanto aplicable cuando $(H-h) \ll h$ y $L \gg h$. Además el perfil debe tener una conductividad hidráulica mas o menos homogénea hasta la capa impermeable.

4.3 FORMULA DE HOOGHOUTT

La formula de Donnan, también fue deducida por Hooghoudt (1936), pudiéndose expresar la ecuación (3) como:

$$R = q = \frac{4K(H + h)(H - h)}{L^2} \quad (4)$$

Considerando que $\Delta h = (H-h)$ y $(H+h) = (2h + \Delta h)$, donde Δh es la altura en metros de la capa de agua sobre el nivel de los drenes en el punto medio de los drenes, es decir la carga hidráulica para el flujo subsuperficial hacia los drenes.

Luego:

$$q = \frac{8K(h + \frac{1}{2}\Delta h)\Delta h}{L^2} \quad (5)$$

La ecuación (5), también puede representarse como:

$$q = \frac{8Kh\Delta h + 4K\Delta h^2}{L^2} \quad (6)$$

Si $h=0$, se obtiene:

$$q = \frac{4K\Delta h^2}{L^2} \quad (7)$$

La **ecuación (7)** representa aparentemente el flujo horizontal por encima de los drenes y se le conoce como la **ecuación de Rothe**.

Si h es grande comparado con Δh , se puede despreciar el segundo miembro del numerador de la ecuación (7), luego:

$$q = \frac{8Kh\Delta h}{L^2} \quad (8)$$

Considerando un suelo con dos estratos cuyo límite de contacto está al nivel de los drenes, luego la ecuación (7) puede expresarse:

$$q = \frac{8K_2h\Delta h + 4K_1\Delta h^2}{L^2} \quad (9)$$

donde:

K_1 = Conductividad Hidráulica del estrato arriba del nivel de los drenes (m/día)

K_2 = Conductividad Hidráulica del estrato abajo del nivel de los drenes (m/día)

En este sentido, Hooghoudt (1940) desarrolló varias formulas. La mas completa de ellas supone que el flujo no solamente es horizontal, sino que parcialmente hasta alrededor de los drenes hay flujo radial.

Con los parámetros que se muestran en el gráfico que se presenta a continuación, la formula de Hooghoudt que combina el flujo horizontal y el radial, se expresa de la siguiente manera:

$$L^2 = \frac{8K_2d(\Delta h - n) + 4K_1(\Delta h^2 - n^2)}{R} \quad (10)$$

donde:

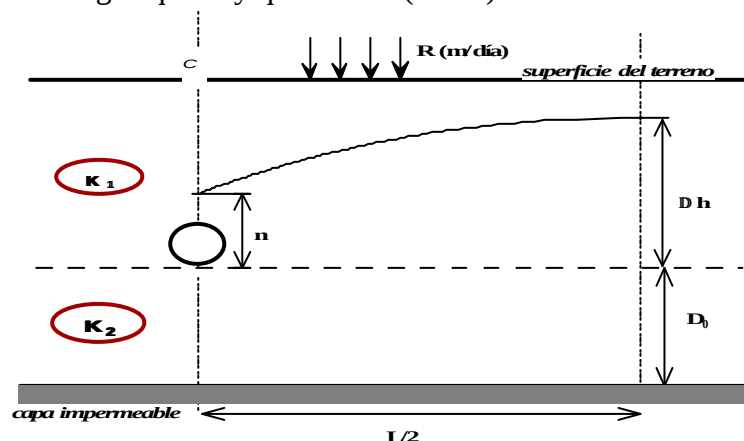
L = espaciamiento de drenes (m).

Δh = distancia vertical entre la horizontal que pasa a nivel del fondo de los drenes y la napa freática en el punto medio entre los drenes (m).

n = distancia vertical entre el fondo del dren y la napa freática sobre el dren (m).

d = espesor del "estrato equivalente" (m).

R = cantidad de agua que hay que drenar (m/día).



Parámetros de la fórmula de Hooghoudt

Los parámetros “n” y “d” se describen a continuación:

El parámetro “n” tiene un significado diferente en el caso de drenaje con zanjas abiertas y en caso de drenaje con tubos.

En el caso de zanjas, “n” es el espesor de la lámina de agua que hay sobre el fondo de la zanja cuando se está drenando la descarga normativa equivalente a R. En este caso, tanto el tamaño como el distanciamiento entre las zanjas se diseñan con la misma descarga normativa. En el caso de drenaje por tubos, “n” es teóricamente la altura de carga necesaria para la resistencia que tiene que vencer el agua para entrar en los tubos. En general, para calcular el espaciamiento de drenes, se ha supuesto que “n” es cero.

Para tener en cuenta la resistencia extra causada por el flujo radial, Hooghoudt introdujo una reducción de la profundidad D_0 , en una profundidad equivalente mas pequeña “d”, donde $d < D_0$.

En este caso, las ecuaciones (9) y (10) se transforman en:

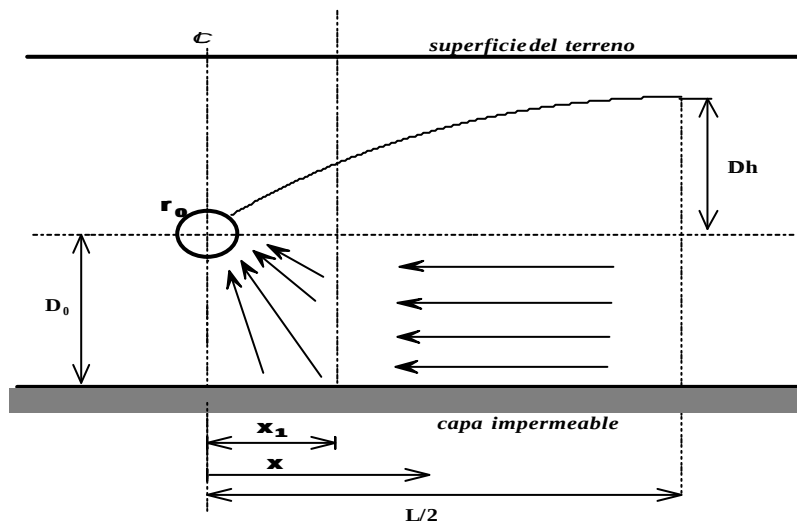
$$L^2 = \frac{8K_2 d \Delta h + 4K_1 \Delta h^2}{R} \quad (11)$$

La ecuación (11) es la llamada formula de Hooghoudt, aunque incompleta, es la mas conocida.

Calculo del Estrato Equivalente (d):

Hooghoudt asume que los dos tipos de flujo, el horizontal y el radial, pueden ser considerados asumiendo (ver gráfico adjunto):

- El flujo en la región: $r_0 < x < x_1$ es radial
- El flujo en la región: $x_1 < x < L/2$ es horizontal.



Esquema del flujo parcialmente radial y horizontal según Hooghoudt

Hooghoudt demostró que:

$$x_1 = \frac{1}{2} \sqrt{2D_0} \approx 0.7D_0$$

Entonces en la región ($r_0 - 0.7 D_0$) el flujo es considerado radial y la pérdida de altura de carga en esta región Δh_r se debe calcular con una formula para flujo radial.

En la región $0.7 D_0 - L/2$ el flujo es considerado horizontal y la pérdida de altura de carga en esta región Δh_h se debe calcular con una formula para flujo horizontal.

La idea básica es por lo tanto, considerar dos regiones de flujo específicamente delimitadas y resolverlas separadamente, para después sumar las parciales pérdidas de carga horizontal (Δh_h) y radial (Δh_r). Así se podría obtener la diferencia de potencial Δh de la formula de Hooghoudt:

$$\Delta h = \Delta h_h + \Delta h_r \quad (12)$$

Hooghoudt sin embargo, usó un artificio para simplificar estos cálculos considerablemente. En la formula para flujo horizontal, reemplazó la profundidad de la capa impermeable D_0 por un factor "d", que es función de D_0 , L y r_0 .

Para calcular el estrato equivalente "d", se puede emplear la relación que a continuación se presenta, aunque es menos exacta, no necesita de tablas para su calculo:

$$d = \frac{D_0}{2.55 \frac{D_0}{L} \ln \frac{D_0}{P} + 1} \quad (13)$$

En esta formula, "P" es perímetro mojado del dren, que es igual a: $P = \Pi r_0$

Van Beers (1965), presenta un nomograma que se muestra en el Anexo N° 1, para calcular "d" según la ecuación anterior.

Así mismo, para el uso de la formula de Hooghoudt, se puede emplear los nomogramas preparados por Van Der Molen y Van Beers (1965).

En los Anexos N° 2 y N° 3, se presentan los indicados ábacos: uno para distanciamientos de 5 a 25 m y otro de 10 a 100 m respectivamente.

Hooghoudt también preparó un extenso juego de tablas dando valores a d, espesor del "estrato equivalente" según los valores de D_0 , L y r_0 . Es por esto que esta formula también se conoce como la "solución tabular de Hooghoudt".

La Tabla adjunta, muestra un ejemplo de este tipo de tablas.

Valores de "d" en m. según Hooghoudt para $r_0 = 0,10$ m.

Esp. Drenes L (m.)	Do (m.)									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
20	1.41	1.67	1.81	1.88						
25	1.51	1.83	2.02	2.15	2.22					
30	1.57	1.97	2.22	2.38	2.48	2.54	2.57			
35	1.62	2.08	2.37	2.58	2.70	2.81	2.85	2.89		
40	1.66	2.16	2.51	2.75	2.92	3.03	3.13	3.18	3.23	3.24
45	1.70	2.23	2.62	2.89	3.09	3.24	3.35	3.43	3.48	3.55
50	1.72	2.29	2.71	3.02	3.26	3.43	3.56	3.66	3.74	3.84
55	1.74	2.34	2.79	3.13	3.40	3.60	3.75	3.86	3.97	4.13
60	1.76	2.39	2.86	3.23	3.54	3.76	3.92	4.06	4.18	4.39
65	1.78	2.43	2.93	3.32	3.66	3.90	4.08	4.24	4.38	4.67
70	1.79	2.46	2.98	3.41	3.76	4.02	4.24	4.42	4.57	4.93
75	1.80	2.49	3.04	3.49	3.85	4.14	4.38	4.57	4.74	5.20
80	1.81	2.52	3.08	3.56	3.94	4.25	4.51	4.72	4.90	5.44
85	1.82	2.54	3.12	3.62	4.02	4.36	4.64	4.86	5.06	5.66
90	1.83	2.56	3.16	3.67	4.10	4.45	4.75	5.00	5.20	5.87
95	1.84	2.58	3.20	3.73	4.17	4.54	4.85	5.12	5.34	6.07
100	1.85	2.60	3.24	3.78	4.23	4.62	4.95	5.23	5.47	6.25
110	1.87	2.62	3.30	3.87	4.35	4.77	5.13	5.44	5.71	6.60
120	1.88	2.65	3.35	3.94	4.45	4.90	5.29	5.63	5.92	6.93
130	1.88	2.68	3.39	4.00	4.55	5.03	5.44	5.80	6.11	7.22
140	1.89	2.70	3.42	4.06	4.63	5.13	5.56	5.95	6.28	7.50
150	1.90	2.72	3.46	4.12	4.70	5.22	5.68	6.09	6.45	7.76
200	1.92	2.79	3.58	4.31	4.97	5.57	6.13	6.63	7.09	8.84
250	1.94	2.83	3.66	4.43	5.15	5.81	6.43	7.00	7.53	9.64

4.4 FORMULA DE ERNST

La ecuación de Ernst, se utiliza en suelos con dos estratos y ofrece unas mejoras sobre las formulas anteriores, ya que el límite entre los dos estratos puede estar por encima o por debajo del nivel de los drenes.

El principio fundamental de la solución de Ernst es el de considerar tres componentes en el flujo: vertical, horizontal y radial. Estos componentes dan un esquema bastante completo del sistema total de flujo que esta basado directamente en la analogía entre las leyes de Darcy y Ohm.

Este concepto implica que la pérdida de carga hidráulica también tiene tres componentes los cuales pueden ser calculados separadamente, teniéndose por superposición la **carga total Dh**:

$$\Delta h = \Delta h_v + \Delta h_h + \Delta h_r \quad (14)$$

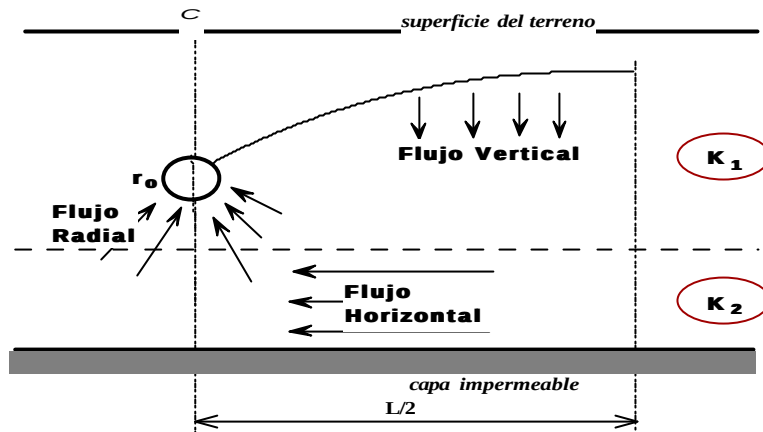
En donde:

Δh = pérdida total de carga hidráulica (m).

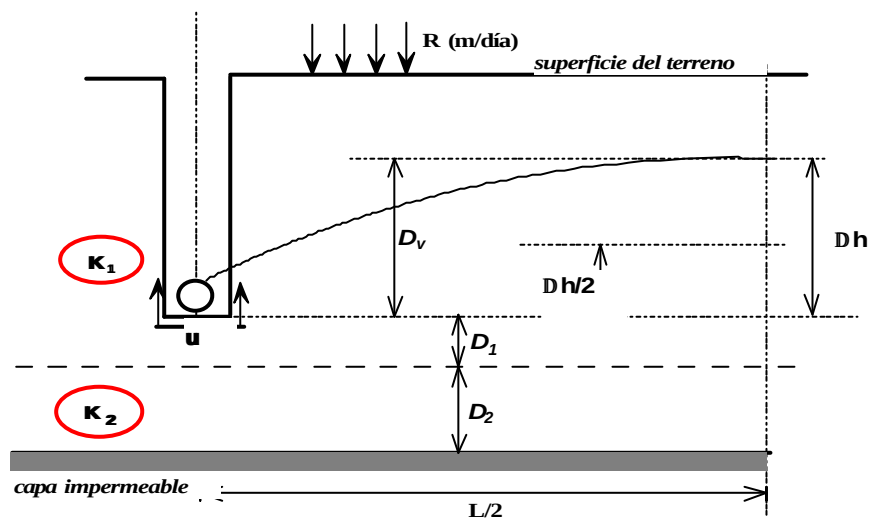
Δh_v = pérdida de carga hidráulica debido a la componente vertical del flujo (m).

Δh_h = pérdida de carga hidráulica debido a la componente horizontal del flujo (m).

Δh_r = Pérdida de carga hidráulica debido a la componente radial del flujo.



Esquematzación del flujo de drenaje de acuerdo a Ernst



Parámetros de la fórmula de Ernst para los componentes vertical y horizontal

A continuación, se trata sobre cada uno de estos componentes:

Componente vertical del flujo (D_{h_v}):

La pérdida de carga hidráulica debido al componente vertical del flujo, sigue la ley de Darcy:

$$\Delta h_v = R \cdot \frac{D_v}{K_1} \quad (15)$$

en el cual:

R = descarga normativa (m/día)

D_v = distancia vertical entre el nivel del punto medio de la napa freática entre los drenes y el fondo de los drenes (m).

K_1 = conductividad hidráulica del estrato superficial (m/día)

La pérdida de carga hidráulica debido al componente vertical del flujo puede ser de importancia, cuando el suelo situado sobre el nivel de los drenes tiene relativamente una baja conductividad hidráulica. En estos casos el flujo se dirige verticalmente hacia abajo a través de esa capa y luego se dirige hacia los drenes como flujo horizontal y radial. Cuando hay varios estratos con conductividades hidráulicas diferentes situados sobre el nivel de los drenes, se puede adicionar las pérdidas de carga de cada estrato:

$$\frac{R \cdot D_v}{K_1} = R \cdot \left(\frac{D_{v1}}{K_{1.1}} + \frac{D_{v2}}{K_{1.2}} + \dots + \frac{D_{vn}}{K_{1.n}} \right) \quad (16)$$

Componente horizontal del flujo (Dh_h):

La formula usada para el calculo de la pérdida de carga hidráulica debido al componente horizontal es la misma que la formula de Donnan, que Ernst presenta en la siguiente forma:

$$\Delta h_h = \frac{RL^2}{8\Sigma KD} \quad (17)$$

en donde:

$$\Sigma KD = K_1 D_1 + K_2 D_2 + \dots + K_n D_n \quad (18)$$

siendo:

R = descarga normativa (m/día)

L = espaciamiento de los drenes (m)

$D_1, D_2, \dots, D_n$ = espesor de los estratos con diferente conductividad hidráulica (m)

$K_1, K_2, \dots, K_n$ = conductividad hidráulica de los diferentes estratos (m/día)

La ecuación anterior, indica que cualquier numero de capas u horizontes del perfil del suelo pueden ser tomados en cuenta por el valor ΣKD . Sin embargo, el espesor total del acuífero no es tomado en cuenta cuando es mas de un cuarto (1/4) del distanciamiento de los drenes.

$$\Sigma D = \frac{1}{4} L \quad (19)$$

En caso que ΣD sea mayor, se toma el valor $\Sigma D = (1/4) L$.

Componente radial del flujo (Dh_r):

La pérdida de carga hidráulica debida al componente radial, se puede expresar de la manera siguiente:

$$\Delta h = R.L.W \quad (20)$$

en donde:

R = descarga normativa (m/día)

L = espaciamiento de los drenes (m)

W = resistencia radial (días/m)

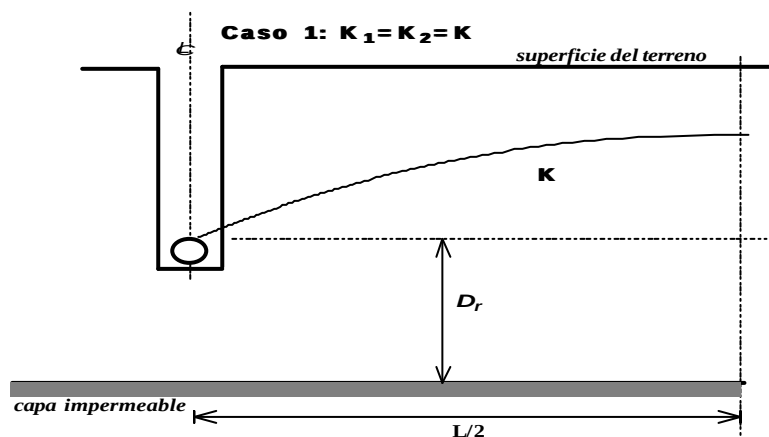
El cálculo de la resistencia radial W presenta algunos problemas porque depende de la ubicación de los drenes respecto al límite entre dos estratos con diferente conductividad hidráulica y a la relación entre estas conductividades hidráulicas.

Sin embargo, debe anotarse primero que para el perímetro mojado de los drenes, que es un valor importante en la determinación de la resistencia radial, Ernst usa un valor diferente al de Hooghoudt. En vez de utilizar Πr_0 como Hooghoudt, Ernst utiliza el perímetro mojado de la zanja vertical de relleno (P) que es igual al ancho de la zanja “b” mas 4 veces el radio exterior del tubo ($4r_0$) ($P = b + 4 r_0$).

En el caso de zanjas con talud, se utiliza $P = b + 2y\sqrt{1+z^2}$, donde “b” es la anchura del fondo de la zanja, “y” es el tirante de agua en dren y “z” es el talud de la zanja (horizontal/vertical).

Ernst llegó a este valor asumiendo que la conductividad del material de relleno en la zanja es muy alta y que el agua está justamente por el tope de los drenes.

Respecto a la relación entre la conductividad hidráulica de los diferentes estratos, se puede distinguir tres casos, considerando en todos ellos la nomenclatura respectiva en todas las ecuaciones de resistencia radial: W (días/m); K = conductividad hidráulica del suelo (m/día); D = espesor del estrato en que ocurre el flujo radial (m); P = perímetro mojado (m).

Caso 1.- $K_1 = K_2$: Suelo homogéneo

Para la resistencia radial en este caso, Ernst encontró:

$$W = \frac{1}{\Pi K} \ln \frac{D_r}{P} \quad (21)$$

Caso 2.- $K_1 \ll K_2$: El estrato superficial tiene una conductividad hidráulica mucho menor que el estrato profundo.

El dren puede tener tres ubicaciones respecto al límite de los estratos:

Caso 2 A: El dren esta ubicado por encima del límite de los dos estratos.

Caso 2 B: El dren esta ubicado en el límite entre los dos estratos.

Caso 2 C: El dren esta ubicado por debajo del límite de los dos estratos.

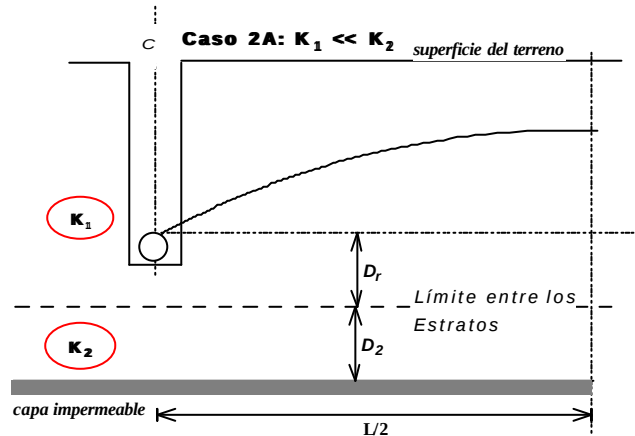
Caso 2 A: Dren ubicado por encima del límite de los dos estratos.

En el **caso 2A**, la conductividad hidráulica es muy importante y se distinguen dos situaciones:

- Si $K_2 \geq 20 K_1$ se tiene: $W = \frac{1}{\Pi K_1} \ln \frac{4D_r}{P}$ (22)

- Cuando $K_2 < 20 K_1$ se tiene: $W = \frac{1}{\Pi K_1} \ln \frac{aD_r}{P}$ (23)

El parámetro "a" se determina del ábaco $a=f(D_2/D_r, K_2/K_1)$ que se muestra en el Anexo N° 4

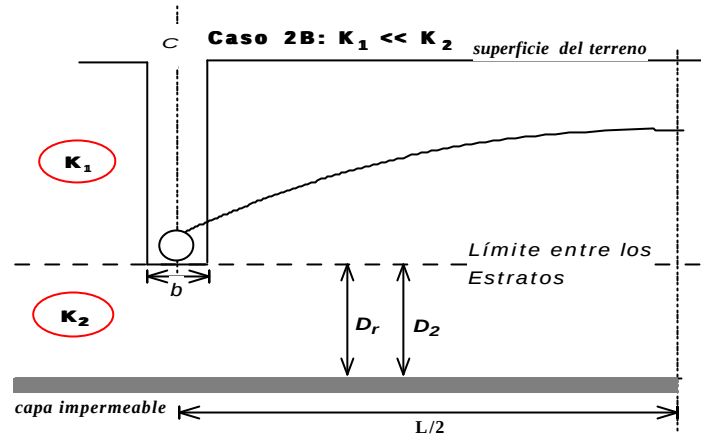


Caso 2 B: Dren ubicado en el límite entre los dos estratos.

En el **caso 2B** (el dren esta en el límite y $K_1 \ll K_2$) se tiene:

$$W = \frac{1}{\Pi K_2} \ln \frac{4D_r}{\Pi b} \quad (24)$$

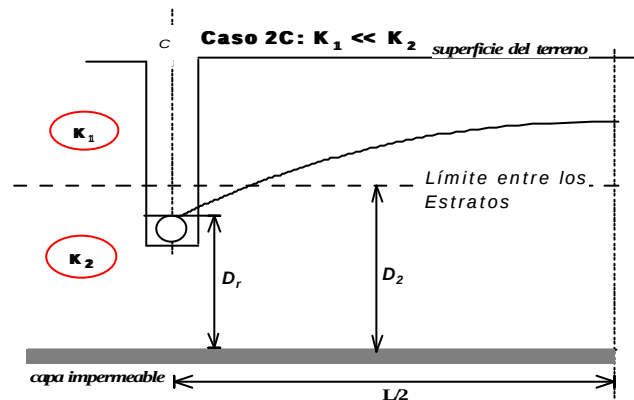
En donde "b" es el ancho de la zanja vertical abierta o rellena.



Caso 2 C: Dren ubicado por debajo del límite de los dos estratos.

En el caso 2C (dren bajo el límite y $K_1 \ll K_2$) se tiene:

$$W = \frac{1}{\pi K_2} \ln \frac{D_r}{P} \quad (25)$$



Caso 3.- $K_1 \gg K_2$: El estrato superficial tiene una conductividad hidráulica mucho mayor que el estrato mas profundo.

Aquí también se tiene que distinguir tres ubicaciones respecto al límite entre los estratos, en la misma forma que en el caso 2:

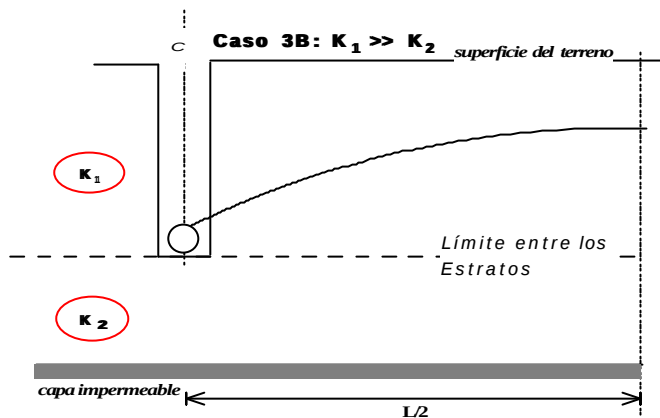
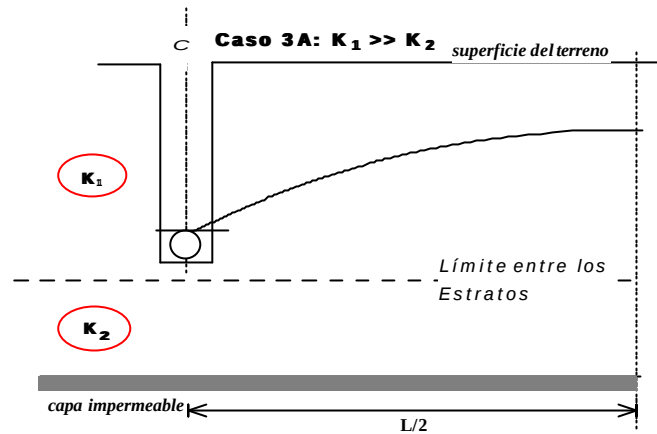
Caso 3 A: El dren esta ubicado por encima del límite de los dos estratos.

Caso 3 B: El dren esta ubicado en el límite entre los dos estratos.

Caso 3 C: El dren esta ubicado por debajo del límite de los dos estratos.

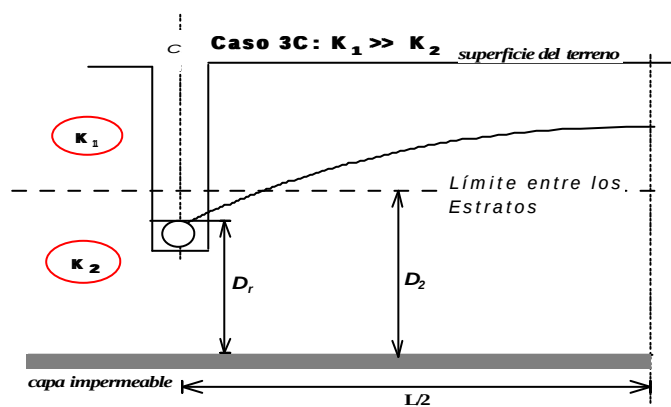
Caso 3 A y 3B: Dren ubicado por encima del límite de los dos estratos y en el límite de los dos estratos.

En los casos 3A y 3B, la formula de Ernst no es muy adecuada. Es mejor utilizar la formula de Hooghoudt.



Caso 3 C: Dren ubicado por debajo del límite de los dos estratos.

En el caso 3C se tiene:
$$W = \frac{1}{\pi K_2} \ln \frac{D_r}{P} \quad (26)$$



FORMULA COMPLETA DE ERNST:

La formula completa a partir de la formula (14) $\Delta h = \Delta h_v + \Delta h_h + \Delta h_r$ será:

$$\Delta h = \frac{RD_v}{K_1} + \frac{RL^2}{8\Sigma KD} + R.L.W \quad (27)$$

En la formula las normas de drenaje están dadas por Δh y R . Los valores de K y D son obtenidos de los estudios de campo y W se puede calcular. Así, todos los parámetros son conocidos, excepto el espaciamiento de los drenes L , que se puede calcular a partir de los otros.

En la ecuación (27), se puede despejar L como en la solución de la ecuación bicuadrada, después de tener el valor numérico de los otros parámetros.

4.5 CONCLUSIONES SOBRE LAS FORMULAS DE REGIMEN PERMANENTE

- A mayor conductividad hidráulica, mayor espaciamiento entre drenes.
- En un suelo homogéneo, a mayor profundidad de drenes, corresponde un mayor espaciamiento.
- Los drenes deben colocarse en los estratos de mayor permeabilidad.
- El movimiento del agua no afecta prácticamente a una profundidad superior a cuarta parte del espaciamiento ($L/4$).
- Los espaciamientos calculados, deben disminuirse en un 15 a 20% para una mayor garantía.

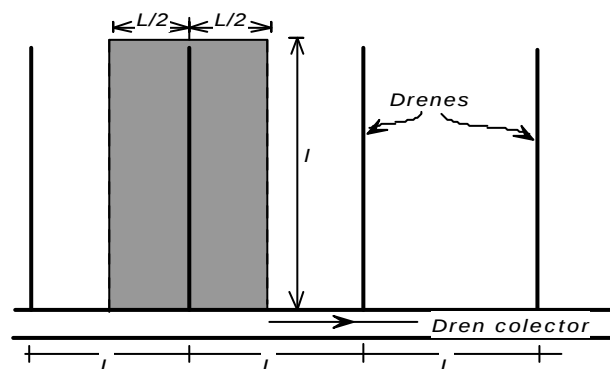
4.6 CAUDAL A ELIMINAR POR LOS DRENES EN REGIMEN PERMANENTE

Una vez determinados el espaciamiento y la profundidad de los drenes, es preciso conocer el caudal que han de transportar, con el objeto de dimensionar las características hidráulicas de estos.

Los drenes son conducciones abiertas o cerradas cuyo caudal aumenta con la longitud.

El caudal en el extremo de un dren si su longitud es " l " será:

$$Q = RLi \quad (28)$$



5. ECUACIONES DE DRENAJE PARA REGIMEN VARIABLE

Las formulas de régimen variable consideran el movimiento de la capa freática, tanto para carga del acuífero como durante la descarga, en consecuencia existe una variación en el nivel de esta.

Como anteriormente se indicó, trataremos la situación de carga instantánea del acuífero (por ejemplo, en riego por gravedad). Si la cantidad de agua aportada, expresada en altura es "R", la capa freática se eleva en una altura R/μ y a continuación comienza a descender. La formula de Glover Dumn estudia esta situación.

FORMULA DE GLOVER DUMN

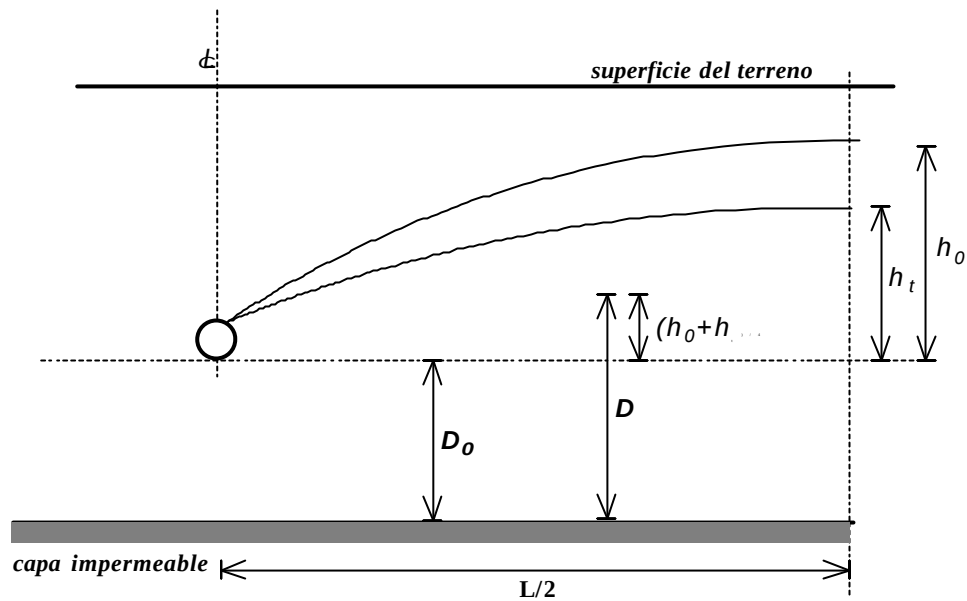
Las formulas de Donnan, Hooghoudt y Ernst anteriormente tratadas están basadas en una situación de flujo con recarga permanente. Esto significa que tanto la altura de la napa freática como la velocidad del flujo que ingresa a los drenes no cambia durante el proceso de drenaje. La recarga de la napa, proveniente de las precipitación y la descarga de los drenes es igual en estas condiciones y ambas son indicadas con el mismo símbolo "R". Aunque, estas condiciones no son exactamente satisfechas en la realidad, la suposición de una situación de flujo permanente ha probado producir muy satisfactoriamente resultados en climas húmedos, cuando las variaciones en precipitación no son extremas.

Sin embargo, cuando nos enfrentamos con problemas de drenaje conectados con irrigación, la recarga es evidentemente no permanente, ya que ocurre a intervalos que son determinados por la frecuencia de riegos. En estas condiciones, puede ocurrir una notoria elevación de la napa freática como resultado de la inevitable precolación de parte del agua aplicada en el riego, seguido por una gradual declinación de la napa en los períodos comprendidos entre dos riegos consecutivos. En estos casos la recarga R y la velocidad de descarga R_d evidentemente no son iguales.

Una formula de drenaje desarrollado para estas condiciones deberá dar respuesta a la pregunta: ¿Cuánto descenderá la napa freática y cual será la velocidad de descarga de los drenes como función del distanciamiento de los drenes y de la recarga no permanente?. Tal formula ha sido derivado por numerosos autores.

La primera formula que aquí se muestra fue obtenida por los estudios de Glover Dumn y presentada por Dumn en 1954:

$$L^2 = \Pi^2 \frac{K.D}{m} \cdot \frac{t}{\ln(1.27 \frac{h_0}{h_t})} \quad (29)$$



en la que:

- L = espaciamiento de los drenes (m)
- K = conductividad hidráulica (m/día)
- D = espesor del estrato en donde hay flujo horizontal (m)
- μ = espacio poroso drenable (fracción)
- h_0 = altura de la napa freática sobre el fondo del dren antes del descenso (m)
- h_t = altura de la napa freática sobre el fondo del dren después del descenso (m)
- t = tiempo en que debe ocurrir el descenso de la napa freática (días)

D es definida como la altura desde la capa impermeable hasta el punto medio de la vertical que va desde el nivel de los drenes hasta la altura promedio de la napa en el punto equidistante entre los drenes, o sea:

$$D = D_0 + \frac{h_0 + h_t}{2} = D_0 + \left(\frac{h_0 + h_t}{4}\right) \quad (30)$$

K , D y μ se miden; la combinación de h_0 , h_t y t constituye las normas de drenaje. El espaciamiento L debe ser tal que después de un riego la napa freática descienda desde h_0 hasta h_t en t días.

La derivación de la formula de Glover se basa en la solución de la llamada ecuación del flujo de calor:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{KD}{m} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (31)$$

Glover asume que inicialmente, esto es al tiempo $t = 0$, existe una napa freática plana, aunque el agua sobre los drenes se mantiene al mismo nivel formando casi un rectángulo.

Las condiciones límites para la solución de la ecuación pueden ahora ser especificadas:

$$Y = Y_0 \text{ para } 0 < x < L \text{ y } t = 0$$

$$Y = 0 \text{ para } x = 0, x = L \text{ y } t > 0$$

La solución de la ecuación diferencial planteada, sujeta a las condiciones arriba mencionadas, para la altura de la napa freática en el punto medio entre los drenes (Y_t), aparece como:

$$Y_t = Y_0 \frac{4}{\Pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[\frac{1}{n} e^{-\left(n^2 \frac{\Pi^2 K D t}{m L^2}\right)} \right] \quad (32)$$

Kraijenhoff van de Leur introdujo el "coeficiente de reservorio" j , en su formula, que es mas completa y que no trata este capítulo. Este coeficiente se puede usar en la formula de Glover de la siguiente manera:

y por tanto:

$$Y_t = Y_0 \frac{4}{\Pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[\frac{1}{n} e^{-(n^2 \cdot t/j)} \right] \quad (33)$$

Para depresiones apreciables de la napa freática cuando $x = L/2$, por ejemplo si Y_t/Y_0 es de 0.8, se puede usar el primer término solamente, con una aproximación suficiente.

La ecuación (33) puede ser escrita en estos casos de la manera siguiente:

$$Y_t = Y_0 \frac{4}{\Pi} e^{-t/j} \quad (34)$$

ó en la forma: $\ln(1.27 \frac{Y_0}{Y_t}) = t/j$ (35)

Entonces cuando: $j = \frac{m L^2}{\Pi^2 K D}$ y $Y_0 = h_0$ y $Y_t = h_t$

La formula de Glover obtenido despejando "L", viene a ser:

$$L^2 = \frac{\Pi^2 K \cdot D}{m} \cdot \frac{t}{\ln(1.27 \frac{h_0}{h_t})} \quad (36)$$

La ecuación para la descarga R_t como función del tiempo sería:

$$R_t = R \cdot \frac{8}{\Pi^2} \cdot \frac{1}{j} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} e^{-n^2 \cdot \frac{t}{j}} \quad (37)$$

Para disminuciones significativas de la napa freática puede usarse solo el primer término de la serie, o sea $n = 1$, teniéndose:

$$R_t = R \frac{8}{\Pi^2 j} e^{-\frac{1}{j}} \quad (38)$$

O de la forma:

$$\ln\left(\frac{0.8 R}{j R_t}\right) = \frac{t}{j} \quad (39)$$

De las ecuaciones anteriores, puede despejarse R_t en función de Y_t y por sustitución de $Y_0 = R/\mu$ se tiene:

$$\frac{Y_t}{Y_n} = \frac{R}{mR} \cdot \frac{4\Pi^2 j e^{-\frac{1}{j}}}{8\Pi e^{\frac{1}{j}}} = \frac{\Pi j}{2m} \quad (40)$$

y sustituyendo j por $\frac{mL^2}{\Pi^2 KD}$ y Y_t por h_t se obtiene:

$$R_t = \frac{2\Pi KD h_t}{L^2} \quad (41)$$

Donde R_t es la velocidad de descarga de los drenes, normalmente expresados en m/día en el tiempo t , cuando la napa freática esta descendiendo.

En 1960, Glover presentó la nueva formula para el espaciamiento de drenes en situación de flujo no permanente.

Esta nueva formula fue obtenida asumiendo que el tiempo $t = 0$, la napa freática tiene la forma de una parábola de cuarto grado. Esta suposición se acerca mas a la realidad que la situación asumida para la primera formula, en que se establecía que la napa era inicialmente plana.

La consecuencia de este cambio en la situación inicial es que en la ecuación (28) el termino $4/\Pi = 1.27$, viene a ser 1.16.

Entonces, la ultima formula de Glover se presenta entonces en la siguiente forma:

$$L^2 = \frac{\Pi^2 KD}{m \cdot \ln\left(1.16 \frac{h_0}{h_t}\right)} \cdot t \quad (42)$$

Debe notarse de que la ecuación para el calculo de R_t debe de ser mantenida y que la relación h_t/R_t no es afectada por el término de $4/\Pi$.

Las formulas de Glover, se basan en un flujo solamente horizontal. No toman en cuenta la resistencia vertical y radial.

Sin embargo, **la resistencia radial se puede incorporar en la formula de la misma manera que en la formula de Hooghoudt**. Entonces, se puede **usar el espesor del estrato equivalente "d" en lugar de la distancia entre el fondo del dren y la capa impermeable (D_0)**. Esta d, depende de L, r_0 y D y se puede usar las mismas formulas o tablas que para la formula de Hooghoudt.

En este caso, la D de la ecuación es igual a:

$$D = d + \frac{h_t + h_0}{4} \quad (43)$$

Los parámetros ya son conocidos.

El coeficiente de reservorio "j" usado por Kraijenhoff van der Leur tiene un sentido físico. Este coeficiente incorpora las características físicas del suelo y las condiciones de drenaje. Estos factores juntos, dictan el movimiento del agua en el suelo. La dimensión de "j" es días.

Cuando "j" es grande la napa freática baja lentamente, porque la transmisibilidad del suelo es pequeña o el espacio poroso drenable y el espaciamiento de drenes son grandes. Al contrario, cuando "j" es pequeña, la napa freática baja rápidamente.

6. CALCULO DEL DIÁMETRO DE LOS DRENES

Una vez conocido el caudal a eliminar por los drenes, el paso siguiente es el cálculo de diámetro y pendiente. Las formulas a utilizar son las siguientes:

6.1 Drenes lisos (cerámicos, hormigón PVC liso):

$$d = 0.193Q^{0.368}i^{-0.211} \quad (36)$$

$$Q = 89d^{2.714}i^{0.572} \quad (37)$$

6.2 Drenes corrugados:

$$d = 0.2557Q^{0.375}i^{-0.187} \quad (38)$$

$$Q = 38d^{2.667}i^{0.5} \quad (39)$$

donde:

d = diámetro interior del dren

Q = caudal a eliminar en m³/s
 i = gradiente hidráulico, sin dimensiones.

Por tanto, una vez conocido Q existen infinitas combinaciones satisfactorias entre " d " e " i ". En la práctica " i " suele venir limitado por la topografía.

El diámetro así calculado debe aumentarse aproximadamente en un 10% (lo que representa un aumento del 30% aproximadamente del caudal transportable), con objeto de tener un margen de garantía frente a defectos en la alineación de los drenes y disminución del diámetro efectivo por colmatación del dren.

BIBLIOGRAFÍA

- o Pizarro Cabello, Fernando.- Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Editora Agrícola Española S. A., Madrid - 1978.
- o International Institute For Land Reclamation and Improvement.- Principios y aplicaciones del drenaje. Wageningen, Holanda, 1977
- o Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO – El Drenaje de las Tierras de Regadío / Manual de Campo N° 9 – Manejo del Agua de Riego. Roma, 1996.
- o Universidad Nacional Agraria La Molina, Departamento de Recursos de Agua y Tierra.- Guía de Prácticas y Notas de Clase del Curso de Ingeniería de Drenaje. Lima, 2000.
- o Centro Nacional de Drenaje y Recuperación de Tierras - Universidad Nacional Agraria La Molina.- Curso Nacional de Drenaje de Tierras Agrícolas. Lima, 1969.
- o Dirección General de Aguas.- IV Curso Latinoamericano de Drenaje de Tierras Agrícolas. Lima, 1974.

FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA HACIA LOS DRENES

ANEXOS

Anexo N° 1

Nomograma para el cálculo del valor “d” de Hooghoudt

Anexo N° 2

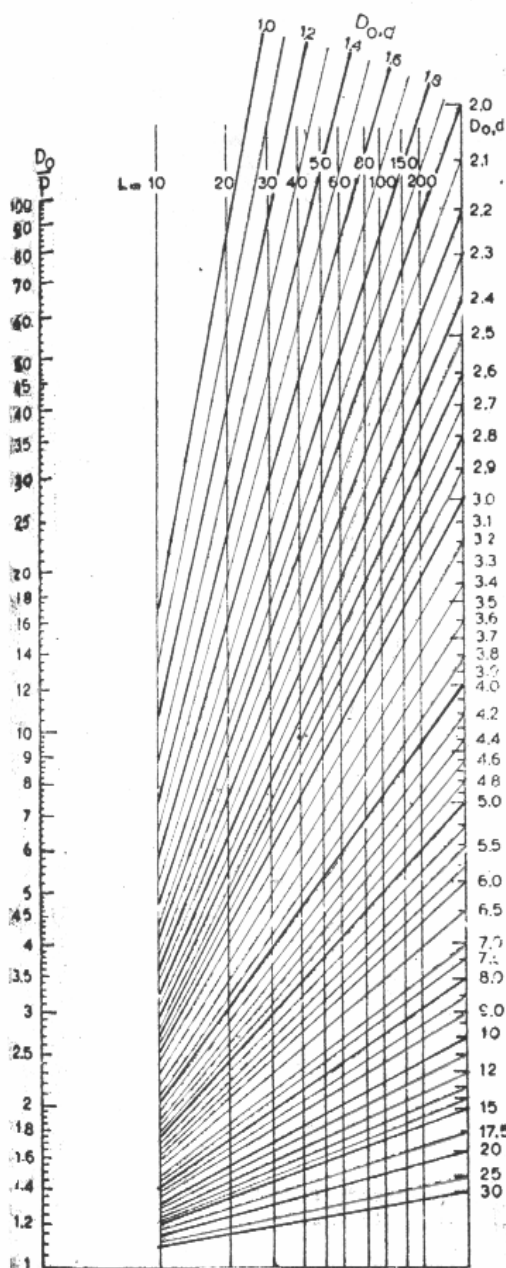
Nomograma de la formula de Hooghoudt para $r_0 = 0.10$ m y $L = 5$ a 25 m (Según Van Beers)

Anexo N° 3

Nomograma de la formula de Hooghoudt para $r_0 = 0.10$ m y $L = 10$ a 100 m (Según Van Beers)

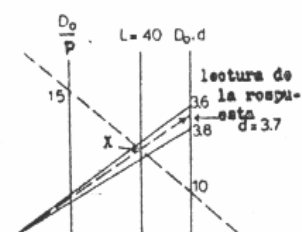
Anexo N° 4

Nomograma para determinar el parámetro “a” para el calculo de la resistencia radial (W).- Suelo debajo de los drenes consistente en dos estratos diferentes

ANEXO N° 1

Nomograma para el cálculo del valor "d" de Hooghoudt de acuerdo a la fórmula:

$$d = \frac{D_0}{\pi L \ln \frac{D_0}{p} + 1}$$



Forma de uso:

- 1) Escoger el valor apropiado para D_0/p y D_0
- 2) Conectar el valor escogido D_0/p a la izquierda de la escala con D_0 a la derecha de la escala
- 3) Encontrar el punto X donde la línea de conexión (2) y el valor escogido L de la escala se intercepten
- 4) Leer el valor de X a la derecha de D_0/d de la escala como el valor "d" de Hooghoudt

Ejemplo:

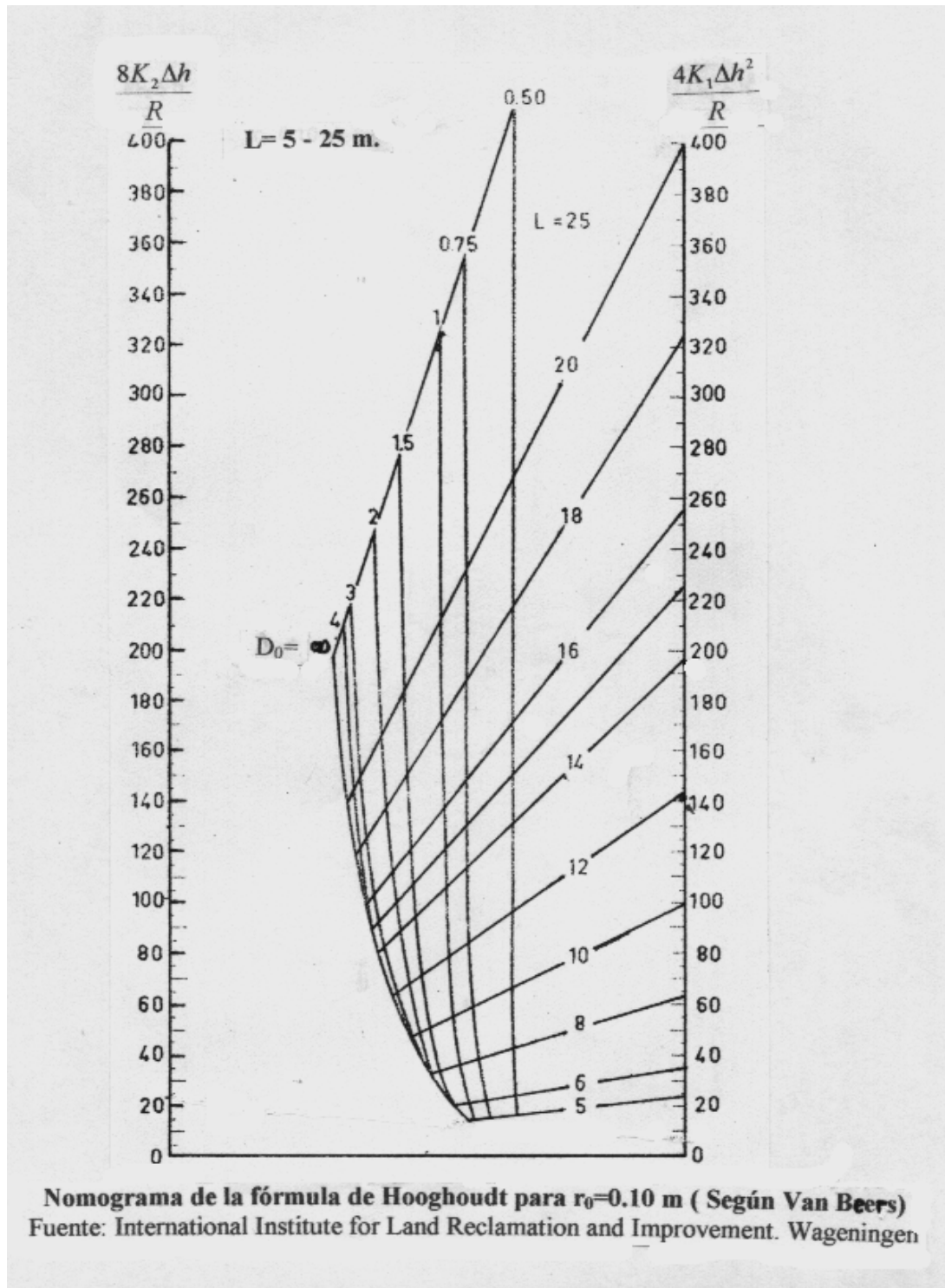
si $D_0/p = 15$ y $D_0 = 10$ m
entonces con $L = 40$ m, lectura de $d = 3.7$

Nota:

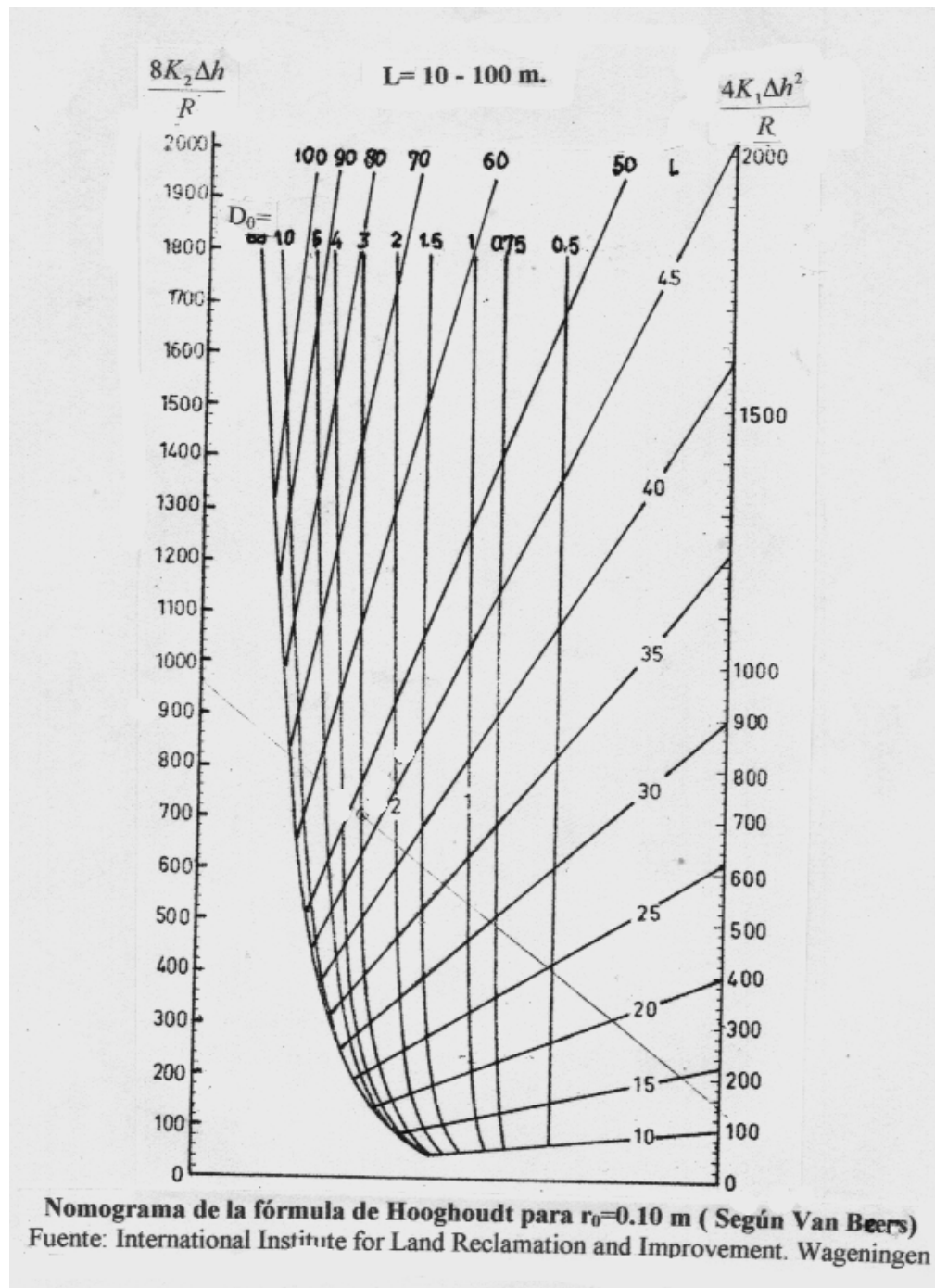
si $D_0 < 2$ se use EMST o calcule "d" con la fórmula arriba mencionada

(después de Van Beers, no publicado, ligeramente modificado).

ANEXO N° 2



ANEXO N° 3



NEXO N° 4

