

# ESPADREN: *Software* para el cálculo de espaciamiento de drenes terciarios

Máximo Villón Béjar <sup>1</sup>

## Palabras clave

Drenaje agrícola, régimen permanente, régimen no permanente, espaciamiento de drenes, estrato equivalente, Visual Basic.

## Resumen

Este trabajo de investigación se orientó a la elaboración de un sistema de cómputo bajo el título ESPADREN, *software* para el cálculo de espaciamiento de drenes, utilizando Visual Basic y pretende ser una herramienta que permita facilitar y simplificar los cálculos laboriosos que se deben realizar en el cálculo de espaciamiento de sistemas de drenaje.

El *software* permite el cálculo de espaciamiento de drenes tanto para régimen permanente, utilizando las fórmulas de Donnan, Hooghoudt, Dagan y Ernst, así como para régimen no permanente, utilizando las fórmulas de Glover-Dumm y Jenab, tanto para drenes abiertos, como para tuberías enterradas. Las alternativas de cálculo se refieren a suelos homogéneos, y a suelos con dos estratos.

En la investigación se probaron diferentes métodos numéricos para la solución de

las ecuaciones, seleccionándose el más adecuado para cada situación. También se probaron ecuaciones de correlación simple y compuesta, lineal y no lineal, para obtener ecuaciones que se ajusten de la mejor manera a los nomogramas y tablas que se usan en el proceso tradicional del cálculo de espaciamiento de drenes.

El producto del trabajo proporciona al ingeniero agrícola, civil, agrónomo y otros especialistas que trabajen en el campo del drenaje, una herramienta que permite realizar cálculos, simulaciones rápidas, y optimizar el diseño.

## Introducción

La computación es, en estos momentos, una parte importante de nuestras vidas y, como tal, se ha convertido en una herramienta básica, la cual se aplica a todas las áreas del conocimiento humano.

A pesar de que existe en el mercado gran cantidad de aplicaciones, que cubren prácticamente todas las disciplinas, con frecuencia hay problemas específicos, a los cuales no se les ha dado solución, por lo que los investigadores debemos

---

<sup>1</sup> Ingeniero agrícola, especialista en ingeniería de recursos de aguas y suelos y computación. Catedrático, Escuela Ingeniería Agrícola. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Teléfono: 550-2595. Correo electrónico: [mwillon@itcr.ac.cr](mailto:mwillon@itcr.ac.cr)

asumir este reto, a fin de llenar estos vacíos.

Actualmente, a escalas nacional e internacional, es escaso el tipo de *software* en el campo del drenaje, concretamente para el cálculo de espaciamiento de drenes. Por tal razón, con el fin de llenar este vacío, este trabajo de investigación se orienta al *Desarrollo de un software para el cálculo de espaciamiento de drenes terciarios* (ESPADREN).

Se pretende que ESPADREN sea una herramienta que simplifique los cálculos laboriosos que se requieren para el cálculo del espaciamiento de drenes terciarios, a fin de que el especialista en drenaje utilice más el tiempo en análisis, que en los cálculos para diferentes alternativas, con lo cual pueda optimizar, técnica y económicamente, sus diseños.

### Objetivo

Elaborar un *software* para el cálculo de espaciamiento de drenes terciarios.

### Fundamentos teóricos

#### Drenaje agrícola

El objetivo del drenaje agrícola es prevenir la presencia de un nivel freático alto y así evitar una excesiva humedad en la zona radicular, la cual, directa e indirectamente, afecta al crecimiento de los cultivos (3).

En Costa Rica, grandes extensiones de terreno, sembradas sobre todo de banano, piña y palma aceitera, requieren, para una óptima productividad, la construcción de estos sistemas de drenaje.

#### Ecuaciones para el cálculo de espaciamiento de drenes

##### Generalidades

En el diseño de un sistema de drenaje, uno de los factores más importantes es el espaciamiento de los drenes. Para

calcular este espaciamiento, diferentes investigadores, basándose en los principios de flujo de agua subterránea, han desarrollado fórmulas.

Al ser el flujo de agua hacia los drenes muy complicado, el desarrollo de una fórmula solamente es posible si se asumen diferentes condiciones limitantes y se realizan simplificaciones. Para cada caso específico, se justifica el uso de una fórmula, cuando las suposiciones adoptadas en su derivación están de acuerdo con la realidad del caso (2).

Según las hipótesis establecidas, las fórmulas de drenaje se pueden agrupar en:

- Fórmulas de régimen permanente o estacionario
- Fórmulas de régimen no permanente o no estacionario

En las de régimen permanente, se supone que la recarga de agua (R) a un área es constante, y la salida de agua (Q) por el sistema de drenaje también es constante, e igual a la recarga; permaneciendo la tabla de agua en forma estacionaria; es decir, que no asciende ni desciende de nivel. Este estado ocurre generalmente en zonas húmedas, donde la precipitación es más o menos constante durante un largo período y sus fluctuaciones no son amplias. En la práctica no se da esta situación; sin embargo, la aplicación de las correspondientes fórmulas suele dar resultados aceptables. Entre los investigadores que han desarrollado fórmulas para este tipo de régimen, se pueden mencionar a Donnan, Hooghoudt, Ernst, Kirkam, Toksoz, Dagan y muchos otros (1).

En los de régimen no permanente, se supone que la recarga de agua (R) a un área no es constante, lo mismo que la salida de agua (Q) por el sistema de drenaje, e incluso cuando la descarga es menor que la recarga. Eso ocasiona la elevación del nivel freático mientras dure la recarga, para luego ir descendiendo

y, posteriormente, volver a elevarse al comenzar el próximo riego o lluvia.

Este estado ocurre en zonas con riego periódico o altas intensidades de lluvia. Entre los principales investigadores que han desarrollado fórmulas para el régimen no permanente se tienen a: Glover-Dumm, Knaijenhoff van de Leur-Maasland, Jenab y otros.

### **Tipos de flujo**

En los sistemas de drenaje, el flujo de agua se descompone en tres formas: Flujo horizontal, flujo vertical y flujo radial.

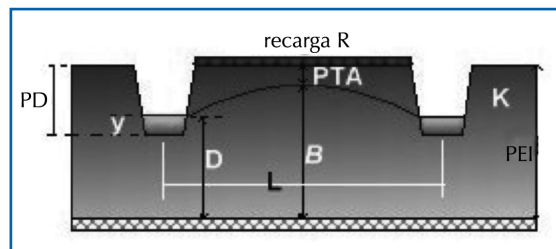
La predominancia de un flujo sobre otro depende de la profundidad a la cual se encuentra la capa impermeable con respecto al nivel de los drenes, con lo que, el flujo vertical es, por lo general despreciable con respecto a los otros flujos.

### **Ecuaciones de drenaje para régimen permanente**

#### **Fórmula de Donnan**

La fórmula más sencilla es la de Donnan. Sus puntos de partida son los siguientes (4):

- El flujo hacia los drenes es permanente.
- El flujo es solamente horizontal.
- El suelo es más o menos homogéneo en toda su profundidad hasta la capa freática.
- Hay un sistema de drenes paralelos infinito en ambas direcciones.
- La recarga es distribuida uniformemente.



La fórmula presentada por Donnan es la siguiente:

$$L^2 = \frac{4K(B^2 - D^2)}{R}$$

donde:

L = Espaciamiento de los drenes (m)

R = Recarga por unidad de superficie (m/día)

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

K = Conductividad hidráulica del suelo (m/día)

B = Altura de la capa freática respecto a la capa impermeable, en el punto medio entre dos drenes (m)

D = Altura del nivel del agua en los drenes respecto a la capa impermeable = espesor del acuífero por debajo del nivel de los drenes (m)

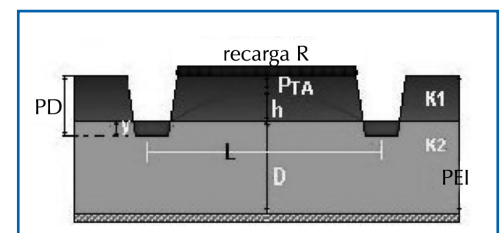
#### **Fórmula de Hooghoudt**

Los puntos de partida de Hooghoudt son los siguientes (4):

- El flujo hacia los drenes es permanente
- El flujo es horizontal y radial
- El suelo esta constituido por dos estratos, encontrándose los drenes en la interfase de los dos estratos.
- La recarga es distribuida homogéneamente.

La fórmula general de Hooghoudt, es:

$$L^2 = \left( \frac{8K_2hd}{R} \right) + \left( \frac{4K_1h^2}{R} \right)$$



donde:

$L$  = Espaciamiento de drenes (m)

$K_1$  = Conductividad hidráulica arriba del nivel de los drenes (m/día)

$K_2$  = Conductividad hidráulica abajo del nivel de los drenes (m/día)

$h$  = Carga hidráulica en el punto medio entre drenes (m)

$d$  = Espesor del estrato equivalente de Hooghoudt, que depende de  $L$ ,  $D$ , y  $r$  (radio de los drenes) (m).

$R$  = Cantidad de agua que hay que drenar o descarga normativa (m/día)

### ***Estrato equivalente***

Con el parámetro  $d$ , espesor del *estrato equivalente*, Hooghoudt en su fórmula introdujo el factor de la resistencia radial que ocurre en la zona cercana al dren, la cual se calcula mediante la fórmula aproximada:

$$d = \frac{D}{2,55 \frac{D}{L} \ln \left( \frac{D}{p} \right) + 1}$$

en esta fórmula,  $p$  es el perímetro mojado del dren, que para tuberías, es  $p = \pi r$

### ***Fórmula de Ernst***

La ecuación de Ernst se utiliza en suelos con dos estratos, y ofrece una mejora sobre las fórmulas anteriores, pues el límite entre los dos estratos puede estar por encima o por debajo del nivel de los drenes (3).

El principio fundamental de la solución de Ernst es el de considerar tres componentes en el flujo: una vertical, una horizontal y una radial. Estas componentes dan un esquema bastante completo, del sistema total de flujo que está basado directamente en la analogía entre las leyes de Darcy y Ohm. Este concepto implica que la pérdida de carga hidráulica tiene también tres

componentes, los cuales pueden ser calculados separadamente, teniéndose por superposición la carga total,  $h$ :

$$h = h_v + h_h + h_r$$

donde:

$h$  = Pérdida total de carga hidráulica (m)

$h_v$  = Pérdida de carga hidráulica debida a la componente vertical del flujo (m)

$h_h$  = Pérdida de carga hidráulica debida a la componente horizontal del flujo (m)

$h_r$  = Pérdida de carga hidráulica debida a la componente radial del flujo (m)

Siendo:

$$h_v = R \frac{D_v}{K_v}$$

donde:

$R$  = Descarga normativa (mm/día)

$D_v$  = Espesor de la zona de movimiento vertical (m)

$K_v$  = Conductividad hidráulica de la zona de movimiento vertical (m/día)

$$h_h = R \frac{L^2}{8 \sum (KD)_h}$$

donde:

$R$  = descarga normativa (m/día)

$L$  = Espaciamiento entre drenes (m)

$\sum (KD)_h$  = Transmisibilidad de la zona del acuífero, donde se desarrolla el movimiento horizontal (m<sup>2</sup>/día).

$$h_r = R \frac{L}{\pi K_r} \ln \frac{a D_r}{u}$$

donde:

R = Descarga normativa (m/día)

$K_r$  = Conductividad hidráulica donde tiene lugar el movimiento radial (m/día)

a = Factor de geometría del movimiento radial (sin dimensiones)

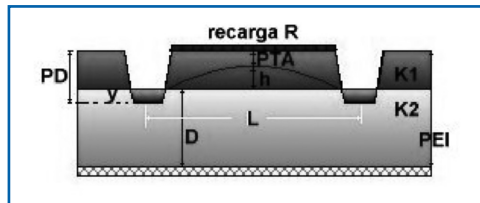
$D_r$  = Espesor del estrato donde tiene lugar el movimiento radial (m)

u = Perímetro mojado del dren (m)

Sustituyendo los componentes radial, vertical y horizontal, se tiene:

$$h = R \frac{D_v}{K_v} + R \frac{L^2}{8 \sum (KD)_h} + R \frac{L}{\pi K_r} \ln \frac{a D_r}{u}$$

### Ecuación de Dagan



La fórmula general de Dagan (4), se puede utilizar para suelos homogéneos o para suelos con dos estratos:

### Ecuación para un suelo homogéneo

$$h = \frac{RL}{K} F_0$$

donde:

$$F_0 = \frac{1}{4} \left( \frac{L}{2D} - \beta \right) \text{ Función de Dagan}$$

$$\beta = \frac{2}{\pi} \ln \left( 2 \cosh \frac{\pi r}{D} - 2 \right)$$

recordar que:  $\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$

### Ecuación para un suelo con dos estratos

$$h = \frac{RL}{K_2} \frac{1}{1 - \frac{R}{K_1}} F_0$$

donde:

$K_1$ : conductividad hidráulica por encima de los drenes

$K_2$ : conductividad hidráulica por abajo de los drenes

En caso de drenes abiertos, recordar

$$r = \frac{P}{\pi}$$

P : perímetro mojado

### Ecuaciones de drenaje para régimen no permanente

#### Ecuación de Glover – Dumm

En zonas regables y en aquellas en que las precipitaciones son de gran intensidad, no se justifica la suposición de una recarga constante.

Para resolver el problema del flujo en estas condiciones, se deben utilizar soluciones para régimen variable.

La derivación de la fórmula de Glover (2), se basa en la solución de la llamada ecuación del flujo de calor:

$$KD \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = U \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots (1)$$

donde:

KD: Transmisibilidad del acuífero (m<sup>2</sup>/día)

- R: Recarga  
 h: Carga hidráulica como función de x, t (m)  
 x: Distancia horizontal desde un punto de referencia, en este caso la localización del dren (m)  
 t: Tiempo (días)  
 U: Porosidad drenable (m/m)

Haciendo una serie de simplificaciones, e introduciendo el estrato equivalente de Hooghoudt, para considerar el flujo radial, se obtiene:

$$L^2 = \frac{\pi^2 k \left( d + \frac{h_0 + h_t}{4} \right) t}{U \ln \left( 1,16 \frac{h_0}{h_t} \right)}$$

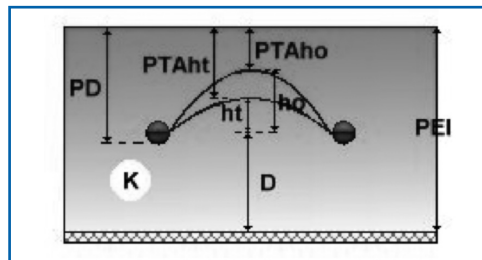
Si no se conoce U, se puede estimar como:

$$U = \sqrt{\frac{k}{100}} ; \quad k : \text{m/día.}$$

### Ecuación de Jenab

La ecuación de Jenab (4), se puede expresar como:

$$L = \sqrt{\frac{4KtL}{\phi}}$$



donde:

$$D = d + \frac{h_0 + h_t}{4}$$

$$d = \frac{D}{\frac{8}{\pi} \frac{D}{L} \ln \left( \frac{D}{\mu} \right) + 1}$$

- K: conductividad hidráulica  
 D: espesor donde ocurre el flujo horizontal  
 t: tiempo en días, necesario para que el agua baje de una posición  $h_0$  a  $h_t$ , es función del cultivo  
 $\phi$ : espacio poroso drenable  
 d: estrato equivalente de Hooghoudt  
 Z: parámetro que se calcula de un nomograma en función de  $h_t/h_0$

### Materiales y métodos

Para el desarrollo del *software* se utilizó *Visual Basic*, versión 6.0, la cual permite crear aplicaciones de 32 bits.

Para la solución de las ecuaciones, se utilizaron los métodos numéricos, tales como:

- algoritmo de Newton Raphson
- método de la secante
- integración gráfica
- interpolación de Lagrange
- algoritmo de Romberg
- desarrollo de series

Muchas soluciones de las ecuaciones se realizan utilizando nomogramas y tablas. Para un proceso computacional, estas se transformaron a ecuaciones, por lo que se investigaron las ecuaciones más adecuadas, utilizando:

- correlaciones lineales simples
- correlaciones no lineales, simples
- correlaciones lineales múltiples
- correlaciones no lineales múltiples

**Espaciamiento de drenes, método de Ernst, para zanjas abiertas en el estrato superior**

Datos:

Recarga (R):  m/día

Profundidad estrato impermeable (PEI):  m

Profundidad segundo estrato (P2E):  m

Profundidad del dren (PD):  m

Profundidad de la tabla de agua (PTA):  m

Conductividad hidráulica estrato superior (K1):  m/día

Conductividad hidráulica estrato inferior (K2):  m/día

Tirante (y):  m

Ancho de solera (b):  m

Talud (Z):

Relaciones del factor geométrico de Ernst:

Relación K2/K1:  Factor geométrico (a):

Relación Dh2/Dr:

Resultados:

Espaciamiento entre drenes (L):  m

Pérdida de carga vertical (hv):  m

Pérdida de carga horizontal (hh):  m

Pérdida de carga radial (hr):  m

Pérdida de carga total (h):  m

Calcular Limpia Pantalla Imprimir Menú Principal

## Resultados

El producto de este trabajo es ESPADREN, una de sus pantallas, correspondiente al método de Ernst, se muestra en la figura anterior.

## Discusión

Los resultados computacionales obtenidos con la aplicación son, en todos los casos, más aproximados que los obtenidos con los nomogramas.

## Agradecimiento

Un especial agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de

Costa Rica, que facilitaron el tiempo y el material para realizar este trabajo.

## Referencias bibliográficas

- 1 Ilri. *Principios y Aplicaciones del Drenaje*. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement; 1977.
- 2 Pizarro, Fernando. *Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos*. Madrid: Editorial Agrícola Española S.A; 1978.
- 3 Villón, Máximo. *Estudio de Reconocimiento de los Problemas de Drenaje: en las Áreas Sembradas de Palma; Coto y Quepos, Costa Rica y San Alejo, Honduras*. Cartago: United Brands Company; 1981.
- 4 Villón, Máximo. *Apuntes de clase del curso Drenaje II*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica; 1985.