



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Evaluación de modelos matemáticos para el diseño de drenaje subterráneo parcelario

TESIS DE GRADO:

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

ÁNGEL HERNÁNDEZ FACUNDO

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:
JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ, Dr.



APROBADA



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2025

Evaluación de modelos matemáticos para el diseño de drenaje
subterráneo parcelario

Tesis realizada por **M.I. Ángel Hernández Facundo** bajo la
supervisión del comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y
aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

DIRECTOR:


Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

ASESOR:


Dr. Mauricio Carrillo García

ASESOR:


Dr. Agustín Ruíz García

LECTOR EXTERNO:


Dr. Roberto Ascencio Hernández

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
DEDICATORIAS.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
DATOS BIOGRÁFICOS.....	vii
RESUMEN GENERAL.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estructura de la tesis.....	4
1.5 Literatura citada.....	6
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Fundamentos teóricos.....	12
2.2.1 Ecuación de Boussinesq unidimensional.....	13
2.2.2 Ecuación de Hooghoudt clásica.....	13
2.2.3 Ecuación de Hooghoudt modificada.....	15
2.2.4 Ecuación de Glover-Dumm clásica.....	17
2.2.5 Ecuación de Glover-Dumm modificada.....	18
2.3 Marco conceptual.....	18
2.4 Literatura citada.....	24
3 REPRESENTATIVIDAD DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA SIMULACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN DRENAJE SUBTERRÁNEO CON INFORMACIÓN DEL SUELO A PARTIR DE FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA.....	30
4 EFECTIVIDAD DE LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL DEL SUELO EN LA MODELACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN DRENAJE SUBTERRÁNEO ..	49
5 CAPÍTULOS PUBLICADOS EN LIBROS.....	70
6 CONCLUSIONES GENERALES.....	98
7 ANEXO.....	100

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 3

Tabla 1 Pruebas experimentales realizadas en suelo heterogéneo.....	34
Tabla 2 Pruebas experimentales realizadas en suelo homogéneo.....	35
Tabla 3 Valores de K y μ del suelo heterogéneo obtenidos con funciones de pedotransferencia	35
Tabla 4 Valores de K y μ del suelo homogéneo obtenidos con funciones de pedotransferencia	35
Tabla 5 Estadísticos del desempeño de la carga hidráulica espacio-temporal con el modelo de Glover-Dumm clásico en el suelo heterogéneo	38
Tabla 6 Estadísticos del desempeño en la estimación de carga hidráulica espacio-temporal con el modelo de Glover-Dumm modificado para el suelo heterogéneo.....	40
Tabla 7 Estadísticos del desempeño espacio-temporal del modelo de Glover-Dumm clásico para un suelo homogéneo.....	41
Tabla 8 Estadísticos del desempeño de la carga hidráulica espacio-temporal del modelo de Glover-Dumm modificada en el suelo homogéneo	42

CAPÍTULO 4

Tabla-1. Pruebas experimentales.	52
Tabla-2. Valores medidos de K_{exp} de los suelos usados en el estudio.	52
Tabla-3. Valores medidos de μ_{exp} de los suelos usados en el estudio.....	53
Tabla-4. Valores de K_{est} y μ_{est} de los suelos usados en el estudio, obtenidos con funciones de pedotransferencia.	53
Tabla-5. Cargas hidráulicas a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) observadas y simuladas con el modelo de Hooghoudt clásico.....	55
Tabla-6. Cargas hidráulicas a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) observadas y simuladas con el modelo de Hooghoudt modificado.....	56
Tabla 7. Estadísticos del desempeño espacio-temporal de la carga hidráulica obtenida con el modelo de Glover-Dumm.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1. Esquema de un sistema de drenaje agrícola subterráneo.....	12
--	----

CAPÍTULO 3

Fig. 1 Representación de un sistema de drenaje subterráneo y simbología usada en los modelos matemáticos.....	32
Fig. 2 Modelo físico experimental: A) Sistema real y B) Representación del sistema	33
Fig. 3 Geometría y simbología usada en el sistema físico experimental para las pruebas de drenaje.....	34
Fig. 4 Carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt clásico a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) a partir del caudal drenado observado: A) configuración A1, B) configuración A2, C) configuraciones A3 y A4	37
Fig. 5 Perfiles de carga hidráulica observada y simulada con el modelo Hooghoudt modificado para la configuración A1 del suelo heterogéneo, de los años: A) 2020, B) 2023 y C) 2024.....	37
Fig. 6 Perfiles de carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt modificado para el suelo heterogéneo, configuraciones: A) A2 (34 h), B) A3 (1.5 h) y C) A4 (3 h).	38
Fig. 7 Carga hidráulica observada y calculada con el modelo de Glover-Dumm clásico a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) en la configuración A1 del suelo heterogéneo.	38
Fig. 8 Evolución espacio-temporal de la carga observada y simulada con la ecuación de Glover-Dumm modificada, para la configuración A1 del suelo heterogéneo, de los años: A) 2020, B) 2023, C) 2024.....	39
Fig. 9 Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con la ecuación de Glover-Dumm modificada, para las configuraciones: A) A2 (34 h), B) A3 (1.5 h) y C) A4 (3 h).	39
Fig. 10 Carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt clásico a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) en el suelo homogéneo, en las configuraciones: A) B1 y B) B2.....	40
Fig. 11 Perfiles de la carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt modificado para el suelo homogéneo, configuraciones: A) B1 y B) B2.	41
Fig. 12 Carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm clásico en las configuraciones B1 y B2 del suelo homogéneo.....	41
Fig. 13 Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con la ecuación de Glover-Dumm para el suelo heterogéneo, configuraciones: A) B1 y B) B2.	42

CAPÍTULO 4

Figura 1. Modelo físico experimental: a) sistema real, b) representación del sistema.	51
Figura 2. Geometría y simbología usada en el sistema físico experimental para las pruebas de drenaje. Las zonas de flujo horizontal y radial corresponden a la propuesta por Mishra y Sing (2007).	51
Figura 3. Medición de descenso del agua en pozo barrenado con sonda HOBO en el modelo físico experimental para la obtención de la conductividad hidráulica saturada: a) suelo homogéneo, b) suelo heterogéneo.	52
Figura 4. Carga hidráulica simulada en el suelo homogéneo y heterogéneo con la ecuación de Hooghoudt a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$), de las configuraciones: a) A1:2020, b) A1:2023, c) A1:2024, d) A2, e) A3, f) A4, g) B1 y h) B2.	56
Figura 5. Carga hidráulica simulada en el suelo homogéneo y heterogéneo con la ecuación de Hooghoudt modificada, de las configuraciones: a) A1:2020, b) A1:2023, c) A1:2024, d) A2, e) A3, f) A4, g) B1 y h) B2. Fr y Fh corresponden a las zonas de aportación de flujo radial y horizontal, respectivamente.	57
Figura 6. Carga hidráulica simulada en el suelo homogéneo y heterogéneo con la ecuación de Glover-Dumm a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$), de las configuraciones: a) A1:2020, b) A1:2023, c) A1:2024, d) A2, e) A3, f) A4, g) B1 y h) B2.	58
Figura 7. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) A1:2020-1h, b) A1:2020-7h, c) A1:2020-17h, d) A1:2023-1h, e) A1:2023-7h, f) A1:2023-17h, g) A1:2024-1h, h) A1:2024-7h, i) A1:2024-17h.	59
Figura 8. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) A3-0.17h, b) A3-1h y c) A3-1.5h.	60
Figura 9. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) A2-1h, b) A2-10h, c) A2-34h, d) A4-0.17h, e) A4-1h, f) A4-3h.	61
Figura 10. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) B1-0.08h, b) B1-0.5h, c) B1-0.67h, d) B2-0.08h, e) B2-0.5h, f) B2-0.75h.	62

DEDICATORIAS

A mi hijo Luis Ángel, a mis padres
y en general a todas esas personas con las que he compartido un momento de
mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico para la realización del Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.

A la Universidad Autónoma Chapingo, a la Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio, al Departamento de Irrigación, al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por la oportunidad brinda para realizar mis estudios de posgrado y los apoyos económicos para desarrollar esta investigación.

Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández, por su apoyo, dedicación y su valioso tiempo para guiarme al realizar este trabajo, toda mi admiración por ser un excelente investigador. Así mismo al Dr. Mauricio Carrillo García y al Dr. Agustín Ruíz García.

A mi familia, por su apoyo incondicional y porque son mi motivación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Ángel Hernández Facundo

Fecha de nacimiento: 01 de octubre de 1990

Lugar de nacimiento: Pajapan, Veracruz

No. de Cartilla militar: D-5706725

CURP: HEFA901001HVZRCN06

Profesión: Ingeniero en Irrigación

Cédula profesional: 11401076



Desarrollo Académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola Chapingo, generación 2006-2009

Licenciatura: Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2009-2013

Maestría: Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2018-2020.

RESUMEN GENERAL

Evaluación de modelos matemáticos para el diseño de drenaje subterráneo parcelario

El aumento de los niveles freáticos, la salinización y contaminación de suelos agrícolas y la variabilidad climática han incrementado la necesidad de contar con modelos matemáticos capaces de representar adecuadamente el flujo subterráneo en distintas condiciones de suelo y configuraciones de instalación de los sistemas de drenaje subterráneo. En este contexto, la presente tesis evalúa de manera integral el desempeño de los modelos de Hooghoudt y Glover–Dumm, utilizados en el diseño de drenes paralelos en régimen permanente y transitorio, considerando sus formulaciones clásicas y una versión modificada. La investigación se desarrolló en un modelo físico experimental bajo dos perfiles de suelo: heterogéneo conformado por dos estratos de textura franca y homogéneo de un estrato de textura arenosa, ambos evaluados bajo distintas configuraciones de instalación y diámetros de drenes. Para cada perfil se obtuvieron experimentalmente la conductividad hidráulica (K) y la macroporosidad (μ) mediante ensayos de pozo barrenado y los volúmenes de agua drenados, y estos mismos parámetros se estimaron mediante funciones de pedotransferencia con el fin de comparar su efecto en la precisión de la modelación de la carga hidráulica sobre los drenes. Inicialmente se evaluó la representatividad de cuatro ecuaciones empleando propiedades estimadas del suelo; posteriormente se analizaron tres de estos modelos parametrizados con información experimental para cuantificar la influencia real de los datos medidos sobre la simulación temporal de la carga hidráulica. Los resultados muestran que la información experimental mejora de manera notable la precisión y coherencia física de las simulaciones, en especial en el suelo heterogéneo, donde la estratificación y la variabilidad de μ modifican la forma del abatimiento. En el suelo arenoso, las ecuaciones clásica y modificada de Hooghoudt mostraron errores menores a 2 cm en la carga hidráulica a la mitad del espaciamiento entre drenes. Los hallazgos confirman que la confiabilidad del diseño depende de parámetros hidráulicos adecuados y coherentes con los supuestos de los modelos matemáticos, y que la información experimental proporciona una base más sólida para obtener predicciones robustas en condiciones reales de campo.

Palabras clave: Flujo radial, Modelo de Boussinesq, Conductividad hidráulica, Macroporosidad, Funciones de pedotransferencia, Glover-Dumm.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Hernández Facundo Ángel, M.I.

Director de Tesis: Prado Hernández Jorge Víctor, Dr.

ABSTRACT

Evaluation of mathematical models for the design of parcel subsurface drainage

The increase in water table levels, soil salinization and contamination in agricultural areas, as well as climate variability, have heightened the need for mathematical models capable of adequately representing subsurface flow under different soil conditions and installation configurations of subsurface drainage systems. In this context, the present thesis comprehensively evaluates the performance of the Hooghoudt and Glover–Dumm models, used in the design of parallel drains under steady-state and transient conditions, considering their classical formulations and a modified version. The research was conducted in a physical experimental model under two soil profiles: a heterogeneous profile composed of two loam-textured layers, and a homogeneous profile consisting of a single sandy-textured layer, both evaluated under different installation configurations and drain diameters. For each profile, hydraulic conductivity (K) and macroporosity (μ) were experimentally obtained through auger-hole tests, as well as the drained water volumes; these same parameters were estimated using pedotransfer functions in order to compare their effect on the accuracy of modeling the hydraulic head over the drains. Initially, the representativeness of four equations was evaluated using estimated soil properties; subsequently, three of these models parameterized with experimental information were analyzed to quantify the actual influence of the measured data on the temporal simulation of the hydraulic head. The results show that experimental information notably improves the accuracy and physical consistency of the simulations, especially in the heterogeneous soil, where stratification and variability of μ modify the shape of the drawdown. In the sandy soil, the classical and modified Hooghoudt equations showed errors of less than 2 cm in the hydraulic head at half the spacing between drains. The findings confirm that the reliability of the design depends on hydraulic parameters that are adequate and consistent with the assumptions of the mathematical models, and that experimental information provides a stronger basis for obtaining robust predictions under real field conditions.

Keywords: Subsurface drainage, Water table, Mathematical models, Hydraulic conductivity, Macroporosity, Pedotransfer functions.

Thesis Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Hernández Facundo Ángel, M.I.

Advisor: Prado Hernández Jorge Víctor, Dr.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

El drenaje agrícola subterráneo es un componente esencial para mantener la productividad en zonas de riego donde el exceso de humedad, la baja permeabilidad o la acumulación de sales afectan el crecimiento de los cultivos. La instalación de drenes enterrados contribuye a regular la profundidad del nivel freático, mejorar la aireación del suelo y prevenir procesos de salinización que comprometen la fertilidad del terreno (Ayars & Evans, 2015; Dou et al., 2021). La importancia de estos sistemas se ha incrementado en el contexto de intensificación agrícola y cambio climático, donde la presión sobre los recursos hídricos exige soluciones de ingeniería más eficientes (Valipour et al., 2020; Shokri & Bardsley, 2015).

En México, diversos diagnósticos confirman que una proporción considerable de las áreas bajo riego presenta problemas de anegamiento y salinidad, lo que limita el rendimiento y la estabilidad productiva (SADER, FAO, & INEGI, 2021). La presencia de horizontes arcillosos y las características propias de sus propiedades hidráulicas, como la baja permeabilidad en condiciones saturadas y la limitada capacidad de drenaje natural, junto con prácticas de riego con excedentes, contribuyen a mantener niveles freáticos someros en muchos distritos del país. Esta situación justifica la rehabilitación e instalación de sistemas de drenaje parcelario (Torres-Guerrero et al., 2016; Yáñez-Díaz et al., 2019).

A nivel internacional, se reconoce que los sistemas de drenaje subterráneo son fundamentales en regiones áridas y semiáridas para evitar la acumulación de sales y mejorar la eficiencia del riego (Skaggs et al., 2012; Christen & Ayars, 2001). Se estima que entre 20 y 30 millones de hectáreas a nivel global presentan degradación severa por salinidad asociada al riego y drenaje insuficiente (Qadir et al., 2014), lo que refuerza la necesidad de contar con modelos de diseño más confiables.

Los modelos matemáticos para drenaje subterráneo han sido herramientas clave desde mediados del siglo XX. La ecuación estacionaria de Hooghoudt (1940) y

la solución transitoria de Glover y Dumm (1964) son dos de los modelos más adoptados debido a su simplicidad y la mínima cantidad de parámetros requeridos (Ritzema, 1994; Oosterbaan & Nijland, 1994). Estas formulaciones derivan de la ecuación de Boussinesq y se apoyan en las hipótesis de Dupuit–Forchheimer, que permiten simplificar la descripción del flujo subterráneo (Boussinesq, 1904; Forchheimer, 1886).

Aunque los modelos analíticos clásicos son ampliamente utilizados en guías técnicas y plataformas de cálculo (USDA-NRCS, 2009; FAO, 2002), la precisión de sus predicciones depende críticamente de los parámetros del suelo utilizados. Propiedades como la conductividad hidráulica saturada y la porosidad drenable presentan una variabilidad considerable incluso a escalas reducidas, especialmente en suelos con elevada heterogeneidad física, como ocurre en muchos suelos agrícolas bajo riego (Hornbuckle et al., 2007; Hu et al., 2021). Esta variabilidad espacial dificulta que un único valor represente adecuadamente el comportamiento hidráulico real en campo, dado que el flujo puede verse influido por diferencias en textura, estructura y continuidad de poros entre horizontes del suelo (Jarvis, 2007; Koestel & Jarvis, 2018).

En la práctica del diseño de drenaje, los ingenieros deben decidir si emplear parámetros medidos experimentalmente, que reflejan mejor las condiciones del suelo pero requieren mayor inversión de tiempo y recursos, o estimados mediante funciones de pedotransferencia, que son más accesibles pero pueden introducir errores importantes (Wösten et al., 2001; Vereecken et al., 2010). Las funciones de pedotransferencia modernas, como Rosetta3, han mejorado la estimación de parámetros hidráulicos en una amplia gama de suelos (Zhang & Schaap, 2017), aunque su desempeño sigue siendo limitado en suelos que presentan variaciones internas de textura, porosidad o estructura, o bien en aquellos con macroporosidad marcada (Marthews et al., 2024).

Diversos estudios han resaltado la importancia de evaluar la validez de los modelos matemáticos cuando se usan parámetros estimados en lugar de medidos. Investigaciones en drenaje subsuperficial han mostrado que la

incertidumbre en parámetros como la conductividad hidráulica conduce a diferencias significativas en la predicción del nivel freático y del espaciamiento óptimo entre drenes (Skaggs, 1999; Nasser et al., 2012). En suelos estratificados o heterogéneos, estas diferencias pueden ser aún más marcadas debido a la variabilidad vertical de los parámetros hidráulicos (Castanheira et al., 2010; Nabi-Sichani & Sepaskhah, 2012).

Modelos más recientes han buscado mejorar la representación del flujo en condiciones reales. Mishra y Singh (2007) propusieron una modificación de la ecuación de Hooghoudt para mejorar el cálculo de la profundidad equivalente y corregir la sobreestimación del nivel freático. Por su parte, Mehdinejadi et al. (2013) desarrollaron un modelo fraccional basado en dinámica no clásica, que ajusta la tasa de abatimiento del nivel freático para representar mejores suelos heterogéneos o con condiciones hidráulicas no lineales.

La necesidad de evaluar la confiabilidad de estos modelos es particularmente relevante en suelos pesados como los suelos francos, ampliamente distribuidos en zonas agrícolas de México y del mundo. Su dinámica hídrica, influenciada por agrietamiento, cambios volumétricos y macroporosidad intermitente, los convierte en un reto para la modelación matemática y la estimación de parámetros hidráulicos (Abdalla et al., 2021; Castellano et al., 2019).

La interacción entre modelos sustentados en distintos supuestos teóricos, parámetros hidráulicos caracterizados por una marcada variabilidad espacial y condiciones edáficas complejas evidencia la necesidad de evaluar con rigor la capacidad real de los modelos matemáticos para reproducir la dinámica del nivel freático en escenarios representativos de campo. Esta tesis doctoral aborda dicha problemática mediante un enfoque analítico y experimental que combina mediciones físicas del comportamiento del nivel freático en un modelo representativo de suelos pesados con simulaciones basadas en parámetros hidráulicos generados a partir de funciones de pedotransferencia y también obtenidos experimentalmente. La comparación entre ambos tipos de información permite identificar el grado de precisión, los sesgos y las limitaciones de los

modelos clásicos y de sus variantes modernas, aportando bases científicas que contribuyen a optimizar el diseño del drenaje subterráneo parcelario y a mejorar la coherencia entre las predicciones teóricas y el comportamiento hidráulico observado bajo condiciones reales de operación.

1.2 Hipótesis

La precisión y representatividad de la simulación del nivel freático en sistemas de drenaje agrícola subterráneo mejoran significativamente cuando los modelos matemáticos de Hooghoudt y Glover–Dumm, en sus versiones clásicas y modificadas, utilizan propiedades hidráulicas del suelo obtenidas experimentalmente, en comparación con las estimadas mediante funciones de pedotransferencia, reduciendo con ello errores de sobre y subdimensionamiento.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la representatividad y aplicabilidad de los modelos matemáticos de Hooghoudt y Glover-Dumm, en sus versiones clásicas y modificadas, para el diseño de sistemas de drenaje agrícola subterráneo.

Objetivos específicos:

1. Analizar la representatividad de los modelos matemáticos de Hooghoudt y Glover-Dumm, en sus versiones clásicas y modificadas, al simular el nivel freático utilizando propiedades hidráulicas del suelo estimadas mediante funciones de pedotransferencia.
2. Evaluar la efectividad de los modelos matemáticos de Hooghoudt y Glover-Dumm, tanto en sus versiones clásicas como modificadas, al simular el nivel freático empleando propiedades hidráulicas obtenidas a partir de mediciones experimentales del suelo.

1.4 Estructura de la tesis

La presente tesis se organiza en cuatro capítulos, diseñados para abordar de manera progresiva la problemática del diseño de drenaje subterráneo parcelario

y la evaluación del desempeño de los modelos matemáticos utilizados para simular la dinámica del nivel freático.

CAPÍTULO 1. En este capítulo se contextualiza la problemática del ascenso del nivel freático, la salinización de suelos agrícolas y la necesidad de sistemas de drenaje subterráneo eficientes ante condiciones variables de suelo y clima. Se presenta la justificación científica y práctica del estudio, los objetivos generales y específicos, y el alcance de la investigación.

CAPÍTULO 2. Este capítulo revisa los fundamentos históricos, teóricos y conceptuales del drenaje subterráneo parcelario, abarcando las ecuaciones clásicas de flujo en medio saturado (Boussinesq, Dupuit, Hooghoudt y Glover-Dumm), sus extensiones modernas y los avances recientes en caracterización hidráulica del suelo. Asimismo, se examina el papel de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, las funciones de pedotransferencia y los criterios actualizados para el diseño y evaluación de sistemas de drenaje agrícola.

CAPÍTULO 3. En este capítulo se analiza la representatividad de los modelos matemáticos de Hooghoudt y Glover-Dumm, tanto en sus versiones clásicas como modificadas, empleando propiedades hidráulicas del suelo estimadas mediante funciones de pedotransferencia. Se evalúa la capacidad de estos modelos para reproducir la dinámica del nivel freático bajo dos condiciones experimentales de suelo y diferentes configuración de drenes, así como los sesgos y limitaciones derivados del uso de información estimada.

CAPÍTULO 4. Este capítulo evalúa la efectividad de los mismos modelos matemáticos (Hooghoudt y Glover-Dumm, en sus versiones clásicas y modificadas) al simular el nivel freático a partir de propiedades hidráulicas del suelo obtenidas mediante mediciones experimentales. Se analizan los beneficios de utilizar información directa del suelo, su impacto en la precisión de las simulaciones transitorias y la coherencia física de los resultados, comparando estos desempeños con los obtenidos al utilizar propiedades estimadas.

CAPÍTULO 5. En este capítulo se presentan las publicaciones en capítulos de libro que fueron generadas a partir de las participaciones realizadas en diversos congresos.

CAPÍTULO 6. En este capítulo se exponen las conclusiones generales de la tesis.

ANEXO. En este anexo se presenta una tabla resumen de los congresos en los que se participó con presentaciones derivadas del proyecto de investigación de doctorado.

1.5 Literatura citada

Abdalla, O., Al-Rumaihi, A., Al-Murad, M., & Ahmed, M. (2021). Groundwater recharge and salinity dynamics in arid soils affected by irrigation. *Journal of Hydrology*, 598, 126345.

Ayars, J. E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface drainage practices in irrigated agriculture. *Irrigation Science*, 33(1), 1–15.

Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10, 5–78.

Castanheira, N. S., Santos, F. L., & Coelho, P. S. (2010). Subsurface drainage modeling in layered soils. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1375–1384.

Castellano, M. J., et al. (2019). Soil structure dynamics in swelling clays under wetting–drying cycles. *Soil & Tillage Research*, 189, 144–152.

Christen, E. W., & Ayars, J. E. (2001). Subsurface drainage design and management in irrigated agriculture. *Irrigation and Drainage Systems*, 15, 1–25.

Dou, X., Eslamian, S., Valipour, M., & Singh, V. P. (2021). Poor drainage-induced salinization of agricultural lands: Management and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124731.

FAO. (2002). Agriculture, food and water. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Forchheimer, P. (1886). Wasserbewegung durch Boden. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 30, 1782–1788.

Frankl, A., et al. (2023). Soil moisture dynamics and hydraulic properties in cracking Vertisol landscapes. *Geoderma*, 431, 116324.

Ghanbarian, B., et al. (2015). Estimating soil hydraulic conductivity using fractal theory. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1), 117–123.

Glover, R. E., & Dumm, L. D. (1964). Groundwater movement in drainage. In *Drainage of Agricultural Lands* (ASA Monograph 7, pp. 215–248).

Hornbuckle, J. W., Christen, E. W., & Faulkner, R. D. (2007). Evaluating multi-level subsurface drainage systems. *Agricultural Water Management*, 89(3), 208–216.

Hu, X., Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2021). Modeling hourly subsurface drainage using transient drainage equations. *Journal of Hydrology*, 548, 749–764.

Jarvis, N. J. (2007). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523–546.

Koestel, J., & Jarvis, N. (2018). Relations between macropore networks and solute transport. *Geoderma*, 343, 116–127.

Marthews, T. R., et al. (2024). Hydro-pedotransfer functions: A roadmap for future development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28, 3391–3414.

Mehdinejadani, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model using fractional derivatives for simulating water table profiles. *Computers & Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794.

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2007). A new drain spacing formula. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 694–703.

Nabi-Sichani, F., & Sepaskhah, A. R. (2012). Evaluating Glover–Dumm equation under varying recharge. *Agricultural Water Management*, 104, 148–157.

- Nasseri, A., Sepaskhah, A. R., & Mahmoodi, S. (2012). Evaluation of drainage equations for different soil conditions. *Irrigation Science*, 30, 83–96.
- Oosterbaan, R. J., & Nijland, H. J. (1994). Determination of drain spacing. In Ritzema (Ed.), *Drainage Principles and Applications* (pp. 161–204). ILRI.
- Qadir, M., et al. (2014). Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum*, 38, 282–295.
- Ritzema, H. P. (1994). *Drainage Principles and Applications* (Vol. 16). ILRI.
- SADER–FAO–INEGI. (2021). Diagnóstico de salinidad y drenaje en sistemas de riego de México.
- Shokri, N., & Bardsley, E. (2015). Soil salinity: Environmental impact and plant growth challenges. *Soil & Water Research*, 10(1), 1–20.
- Skaggs, R. W. (1999). Drainage simulation models. In Skaggs & van Schilfgaarde (Eds.), *Agricultural Drainage* (ASA Monograph 38, pp. 469–500).
- Skaggs, R. W., Youssef, M. A., & Chescheir, G. M. (2012). DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1509–1522.
- Torres-Guerrero, J., et al. (2016). Soil salinity mapping for irrigation districts in Mexico. *Agrociencia*, 50, 1–15.
- USDA–NRCS. (2009). *National Engineering Handbook – Part 624: Drainage*. U.S. Department of Agriculture.
- Valipour, M., Singh, V. P., & Eslamian, S. (2020). Drivers of soil salinity under climate change. *Journal of Arid Environments*, 181, 104–210.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., & van Genuchten, M. T. (2010). Estimating hydraulic parameters with pedotransfer functions. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 795–820.
- Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions as a bridge between soil properties. *Journal of Hydrology*, 251(3–4), 123–150.

Yáñez-Díaz, M., et al. (2019). Groundwater and salinity dynamics in irrigated clay soils of Mexico. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 18, 33–47.

Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2017). Weighted recalibration of the Rosetta model (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, 547, 39–53.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

El drenaje subterráneo agrícola, entendido como la instalación de tuberías enterradas (drenes) para evacuar el exceso de agua del suelo, es una práctica con más de dos siglos de antigüedad (Smedema et al., 2004). Su desarrollo histórico responde a la necesidad de contrarrestar los efectos negativos del anegamiento y la salinidad en suelos cultivados. Desde mediados del siglo XX, numerosos autores han documentado cómo la irrigación continua sin un drenaje adecuado ha vuelto improductivas extensas áreas agrícolas por saturación hídrica y acumulación de sales (Singh, 2020; Ayars & Evans, 2015). En regiones áridas y semiáridas, el drenaje subterráneo es esencial para controlar la salinidad del perfil, mientras que en zonas húmedas permite remover el excedente de agua y mantener niveles freáticos apropiados (Dou et al., 2021; Valipour et al., 2020). Estos beneficios han posicionado al drenaje subterráneo como una estrategia clave para conservar la productividad agrícola y la sostenibilidad de los suelos de riego (Hornbuckle et al., 2007; Dou et al., 2022).

En México, la problemática de suelos mal drenados y salinizados es particularmente relevante. Se estima que de los 25.7 millones de hectáreas de superficie agrícola nacional, cerca del 50% presenta afectaciones por salinidad o sodicidad (SADER, FAO & INEGI, 2021). Además, aproximadamente 10% de las tierras bajo riego y 16% de la superficie de temporal enfrentan problemas severos de anegamiento y salinización (Namuche Vargas et al., 2019). Ante este panorama, ha cobrado impulso la implementación de sistemas eficientes de drenaje subterráneo para controlar el nivel freático y remover sales del perfil edáfico, contribuyendo a la recuperación y mantenimiento de la fertilidad de los suelos agrícolas (Yáñez-Díaz et al., 2019; IMTA, 2019). Organismos internacionales y nacionales han publicado lineamientos técnicos para el diseño de drenajes parcelarios, como el Drainage Design Manual de FAO (2002) y estudios del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) enfocados en áreas con problemas de salinidad y encharcamiento (IMTA, 2019). Estos

documentos destacan la importancia de un diseño adecuado de los drenes (profundidad, diámetro y espaciamiento) para lograr un descenso eficaz del nivel freático sin incurrir en costos excesivos.

El diseño óptimo de un drenaje subterráneo conlleva un delicado balance: si los drenes se espacian demasiado, el agua puede acumularse entre ellos y alcanzar la zona radicular en épocas de lluvia o riego intenso, dañando los cultivos; por otro lado, si se instalan muy juntos, se encarecen innecesariamente las obras (Shokri & Bardsley, 2015). Para determinar el espaciamiento apropiado es indispensable predecir la elevación máxima del nivel freático entre drenes, lo cual se logra mediante modelos matemáticos que representan el flujo de agua en el suelo (Skaggs & van Schilfgaarde, 1999; Ritzema, 2006). Históricamente, los primeros modelos analíticos de amplio uso surgieron a mediados del siglo XX. Destacan la ecuación de Hooghoudt (1940) para condiciones estacionarias y la solución de Glover–Dumm (1964) para flujo transitorio hacia drenes paralelos. Estas formulaciones, basadas en simplificaciones aceptables y comprobación experimental, se adoptaron globalmente por su facilidad de aplicación en campo (Ritzema, 1994; Oosterbaan & Nijland, 1994). Autores como Palacios-Vélez et al. (2004) documentan aplicaciones exitosas de Hooghoudt en suelos tropicales de México, incluso en perfiles complejos como Vertisoles, obteniendo desempeños satisfactorios. A lo largo de las décadas se han desarrollado también modelos numéricos más complejos, como el programa DRAINMOD (Skaggs, 1982; Skaggs et al., 2012), que resuelve las ecuaciones de flujo no saturado–saturado para simular el drenaje bajo condiciones climáticas y de riego variables. No obstante, en la práctica del diseño parcelario continúan empleándose ampliamente las fórmulas analíticas clásicas y sus variantes mejoradas, por brindar estimaciones rápidas del espaciamiento de drenes a partir de parámetros básicos del suelo y condiciones de diseño (FAO, 2002).

Los antecedentes evidencian que el drenaje subterráneo ha sido y sigue siendo una herramienta crucial en la ingeniería agrícola para mitigar el anegamiento y la salinización. Su evolución histórica, desde los primeros tubos de drenaje hasta

los modelos matemáticos modernos, refleja un esfuerzo continuo por comprender y predecir el comportamiento del nivel freático bajo distintas condiciones. En las siguientes secciones se abordan con mayor detalle los fundamentos teóricos de los modelos de drenaje más utilizados, así como los conceptos clave relacionados con las propiedades hidráulicas del suelo que condicionan su diseño y eficacia.

2.2 Fundamentos teóricos

El análisis del flujo de agua en sistemas de drenaje agrícola subterráneo ha sido abordado clásicamente a partir de la ecuación de Boussinesq (1904), la cual describe el movimiento del nivel freático en medios porosos saturados bajo condiciones de flujo no estacionario. A partir de esta formulación se han derivado diversas expresiones analíticas y aproximaciones simplificadas que permiten estimar la separación óptima entre drenes, tanto en régimen permanente como en régimen transitorio, en función de las propiedades hidráulicas del suelo y la geometría del sistema.

La Figura 1 muestra el esquema conceptual de un sistema de drenaje agrícola subterráneo, donde se observa el perfil del nivel freático entre dos drenes paralelos, la profundidad del dren, el espesor efectivo del suelo drenado y la capa impermeable. Este diagrama sirve como base para la formulación teórica de los modelos evaluados en el presente estudio.

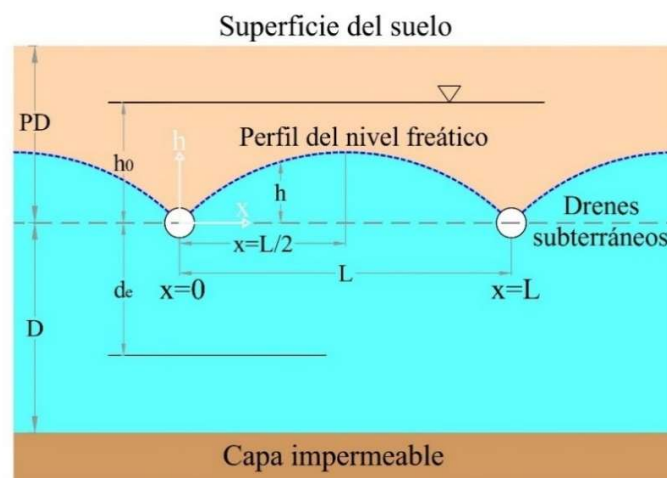


Figura 1. Esquema de un sistema de drenaje agrícola subterráneo.

2.2.1 Ecuación de Boussinesq unidimensional

La ecuación de Boussinesq (1904) considera principalmente la zona saturada del suelo, mientras que la zona no saturada es incorporada de manera simplificada mediante un parámetro de almacenamiento. La forma unidimensional de esta ecuación considerando una recarga vertical uniforme, se expresa como (Ritzema, 2006):

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = K \left[\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + R \quad (1)$$

Donde $h(x, t)$ es la carga hidráulica sobre los drenes (m), K conductividad hidráulica saturada en dirección horizontal (m día^{-1}), μ porosidad drenable (adimensional), x distancia espacial (m), t tiempo (día) y R es una recarga vertical neta (m día^{-1}).

2.2.2 Ecuación de Hooghoudt clásica

Una de las soluciones más conocidas y utilizadas en drenaje agrícola es la propuesta por Hooghoudt (1940), quien adaptó la ecuación unidimensional de Boussinesq para condiciones de régimen permanente, a fin de estimar la separación óptima entre drenes paralelos. Esta formulación se basa en varias suposiciones fundamentales, entre ellas: flujo unidimensional estacionario ($\partial h / \partial t = 0$), recarga vertical uniforme e igual al caudal drenado ($R = q$), propiedades hidráulicas homogéneas o estratificado con conductividades hidráulicas saturadas constantes (K_1 y K_2) y la existencia de una capa impermeable a profundidad finita por debajo del nivel de los drenes. Estos supuestos han sido ampliamente descritos y validados por diversos autores (Ritzema, 1994; Skaggs et al., 2012) lo que ha consolidado el uso de esta ecuación en condiciones de régimen permanente.

La ecuación de Hooghoudt también se apoya en la aproximación de Dupuit–Forchheimer, la cual permite simplificar el análisis del flujo subterráneo asumiendo que la dirección del flujo es predominantemente horizontal, y que los gradientes verticales de potencial hidráulico pueden ignorarse fuera de la zona

inmediata al dren (Bear, 1972; Hillel, 1998). En la proximidad de los drenes, donde esta suposición pierde validez, Hooghoudt introdujo un término correctivo que incorpora la resistencia al flujo radial, representada mediante un espesor equivalente d_e , el cual integra los efectos combinados de flujo horizontal y radial hacia los drenes (Bouwer, 1978; Skaggs et al., 2012). Bajo estas condiciones, la ecuación general de Hooghoudt se expresa como:

$$L^2 = \frac{8K_2d_e h + 4K_1 h^2}{q} \quad (2)$$

Donde L es el espaciamiento entre drenes (m), K_1 es la conductividad hidráulica del estrato superior y K_2 la del estrato inferior (m día^{-1}), h es la carga hidráulica medida a la mitad del espaciamiento entre drenes ($L/2$), q es el caudal drenado por unidad de superficie (m día^{-1}) y d_e el espesor equivalente de Hooghoudt (m).

La determinación precisa de d_e fue originalmente realizada por Hooghoudt mediante el uso de funciones de potencial e imágenes hidráulicas. Sin embargo, debido a la complejidad de su cálculo, Van der Molen y Wesseling (1991) derivaron una expresión analítica que permite estimar d_e de manera práctica y confiable, como:

$$d_e = \frac{\pi L}{8} \left[\ln \frac{L}{\pi r} \right] + f(x) \quad (3)$$

Donde r es el radio del dren (m), $x = \frac{2\pi(D)}{L}$ es un parámetro adimensional que representa la distancia vertical entre el dren y la capa impermeable. La función correctiva $f(x)$ está dada por la siguiente serie infinita:

$$f(x) = \sum_{n=1, 3, 5, 7, \dots}^{\infty} \frac{4e^{-2nx}}{n(1 - e^{-2nx})} \quad (4)$$

Esta función toma relevancia cuando la capa impermeable se encuentra relativamente cercana a los drenes, ya que intensifica el componente de flujo radial. Su omisión puede ser aceptable cuando dicha capa está a gran profundidad, pero en configuraciones más complejas su inclusión mejora

considerablemente la precisión del modelo (Wesseling & Kessler, 1994; Ritzema, 1994; Skaggs et al., 2012).

Diversos investigadores, tales como Ernst (1962) y Ritzema (2006), destacaron que una estimación inadecuada de d_e puede alterar significativamente el desempeño hidráulico: una subestimación reduce innecesariamente el espaciamiento y eleva los costos, mientras que una sobreestimación puede inducir saturación del suelo. Investigaciones más recientes confirman esta sensibilidad; Shokri y Bardsley (2015) demostraron que errores en d_e generan sobreestimaciones del nivel freático, y Tzimopoulos y Tsakiris (2023) reafirmaron su relevancia para representar la interacción entre flujos radial y horizontal. Asimismo, estudios experimentales y de modelación como los de Rathod et al. (2020), Camussi et al. (2022), Valayamkunnath et al. (2022) y Abd-Elaziz et al. (2025) han validado la ecuación de Hooghoudt en distintos contextos edáficos, evidenciando que el ajuste adecuado de d_e mejora la precisión del diseño y la eficiencia hidráulica del drenaje agrícola.

2.2.3 Ecuación de Hooghoudt modificada

La formulación de Mishra y Singh (2007) integra simultáneamente el flujo radial alrededor del dren y el flujo horizontal en el resto del perfil. El flujo radial se presenta desde el radio del dren (r_0) hasta un radio máximo r_r , el cual obtuvieron aplicando una condición de balance de masa y de diferenciabilidad en la interfaz entre las zonas de flujo radial y horizontal.

La carga hidráulica en la interfaz entre el flujo radial y horizontal $h(r_r)$ se obtiene resolviendo la siguiente ecuación implícita, válida cuando $\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right) > 0$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right) + \frac{R}{K} \right] \\ - \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{\pi L}{4 \left(r_0 - \frac{L}{2} \right)} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi L}{4 \left(r_0 - \frac{L}{2} \right)} \right) + \frac{R}{K} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\pi}{8\sqrt{\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right)}} \ln \left\{ \frac{\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right) + \frac{R}{K}}{\left(\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right) + \frac{\pi}{4} + \sqrt{\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right)} \right)^2} \right\} \\
& - \ln \left\{ \frac{\left(\frac{\pi L}{4\left(r_0 - \frac{L}{2}\right)} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi L}{4\left(r_0 - \frac{L}{2}\right)} \right) + \frac{R}{K}}{\left(\left(\frac{\pi L}{4\left(r_0 - \frac{L}{2}\right)} \right) + \frac{\pi}{4} + \sqrt{\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right)} \right)^2} \right\} - \ln \left(\frac{\frac{L}{2} - r_0}{\frac{L}{2} - \frac{2D}{\pi}} \right) = 0
\end{aligned}
\tag{5A}$$

Cuando $\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right) < 0$, la relación equivalente es la siguiente:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right) + \frac{R}{K} \right] \\
& - \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{\pi L}{4\left(r_0 - \frac{L}{2}\right)} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi L}{4\left(r_0 - \frac{L}{2}\right)} \right) + \frac{R}{K} \right] \\
& + \frac{\pi}{4\sqrt{\left(\frac{R}{K} - \frac{\pi^2}{16}\right)}} \left[\tan^{-1} \left\{ \frac{\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right)^2 + \frac{\pi}{4}}{\sqrt{\left(\frac{R}{K} - \frac{\pi^2}{16}\right)}} \right\} - \tan^{-1} \left\{ \frac{\left(\frac{\pi L}{4\left(r_0 - \frac{L}{2}\right)} \right) + \frac{\pi}{4}}{\sqrt{\left(\frac{R}{K} - \frac{\pi^2}{16}\right)}} \right\} \right] \\
& - \ln \left(\frac{\frac{L}{2} - r_0}{\frac{L}{2} - \frac{2D}{\pi}} \right) = 0
\end{aligned}
\tag{5B}$$

2.2.4 Ecuación de Glover-Dumm clásica

La solución desarrollada por Glover y Dumm (1961) para el cálculo del espaciamiento entre drenes en régimen transitorio se deriva de la ecuación de unidimensional de Boussinesq (Ecuación 1), bajo un conjunto de hipótesis que simplifican su resolución analítica. Estas suposiciones contemplan las de Dupuit–Forchheimer y las siguientes (Ritzema, 2006; Skaggs et al., 2012: (i) la carga hidráulica respecto a la capa impermeable (h) es considerablemente mayor que las variaciones locales del nivel freático ($\partial h/\partial x$), de modo que se puede tomar h como un espesor promedio constante de la capa transmisora de agua igual a D , es decir $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$ y $h \approx D$; (ii) la conductividad hidráulica a saturación (K) se considera constante en todo el perfil del suelo; (iii) un ascenso instantáneo del nivel freático de modo que no existe recarga adicional durante el proceso de drenaje, es decir, $R = 0$; y (iv) la capacidad de almacenamiento del suelo se aproxima mediante una porosidad drenable constante ($\mu = \text{cte}$), correspondiente a la fracción de volumen de agua que puede ser liberada al disminuir el nivel freático. Bajo estas condiciones, se obtiene una solución analítica para describir el comportamiento transitorio del nivel freático entre drenes paralelos, representada mediante la expresión:

$$h(x, t) = \frac{4h_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-C_v \left(\frac{n\pi}{L}\right)^v t} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (6)$$

donde h_0 es la carga hidráulica inicial, L el espaciamiento entre drenes, y x la posición respecto a un dren. El parámetro C_v es el coeficiente de disipación de la carga, mientras que v representa el exponente de atenuación, el cual define la forma de amortiguamiento del nivel freático a lo largo del tiempo, y sus valores son:

$$C_v = \frac{\pi K D}{\mu L^2} \quad (7)$$

$$v = 2 \quad (8)$$

En su formulación clásica, se considera que el modelo sigue una ley difusiva de segundo orden.

2.2.5 Ecuación de Glover-Dumm modificada

La ecuación de Glover–Dumm fue extendida por Mehdinejadiani et al. (2013) mediante una formulación fraccionaria de la ecuación de Boussinesq (Ecuación 7), con el propósito de describir el comportamiento transitorio del nivel freático en suelos heterogéneos. En esta versión, se introducen dos parámetros con significado físico: el índice de heterogeneidad (ν) y el coeficiente de difusividad hidráulica generalizado (C_ν). El parámetro ν toma valores entre 1 y 2, y cuantifica el grado de heterogeneidad del suelo: para $\nu = 2$ la ecuación se reduce al modelo clásico de Glover-Dumm y supone que se trata de un suelo homogéneo, mientras que valores menores reflejan variaciones espaciales en la conductividad hidráulica y la porosidad drenable. Por su parte, C_ν integra las propiedades hidráulicas efectivas del medio y controla la velocidad de propagación del frente de drenaje.

$$\frac{\partial h(x, t)}{\partial t} = C_\nu \frac{\partial^\nu h(x, t)}{\partial x^\nu} \quad (9)$$

La solución general obtenida para una condición inicial de carga h_0 y con condiciones de frontera de tipo Dirichlet es:

$$h(x, t) = \frac{4h_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-C_\nu \left(\frac{n\pi}{L}\right)^\nu t} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (10)$$

2.3 Marco conceptual

El desempeño y la aplicabilidad de los modelos de drenaje subterráneo dependen críticamente de la calidad y representatividad de la información del suelo utilizada como insumo. En particular, parámetros como la conductividad hidráulica saturada y la macroporosidad del suelo juegan un rol determinante en la predicción del nivel freático, y su obtención confiable es un desafío vigente en la ingeniería de riego y drenaje. A continuación, se integran los conceptos teóricos clave relacionados con estos parámetros:

Conductividad hidráulica saturada (K). Este coeficiente define la facilidad con que el agua atraviesa un suelo completamente saturado; depende de la textura, la estructura y otras propiedades como la temperatura y la viscosidad del agua. En

el contexto del drenaje, K determina la rapidez con que el agua puede fluir horizontalmente hacia los drenes y verticalmente hacia capas más profundas. Un valor alto de K permite un drenaje más eficiente, mientras que un K bajo implica que el agua se mueve lentamente y podría requerir drenes más cercanos. Numerosas investigaciones han demostrado que K puede variar en varios órdenes de magnitud incluso dentro de un mismo sitio, influenciado por factores como el tipo de suelo, la densidad aparente y la escala espacial de medición. Gupta et al. (2021) reportan variaciones muy amplias de K en suelos agrícolas, y otros autores han registrado valores de K que oscilan entre pocos cm/día hasta cientos de m/día dependiendo de la presencia de grietas y canales preferenciales (Abesh & Hubbard, 2023; Marthews et al., 2024). Esta elevada heterogeneidad espacial de K implica que asignar un único valor representativo para el diseño de drenaje es complejo. Si se subestima K , el diseño podría ser conservador; si se sobrestima, podría fallar en mantener el nivel freático bajo control. Por ello, es esencial caracterizar adecuadamente la conductividad del perfil, sea mediante mediciones directas exhaustivas o usando métodos de estimación confiables.

Macroporosidad (μ) y poros de drenaje. En suelos naturales, la porosidad total se compone de poros de diverso tamaño. La macroporosidad hace referencia específicamente a la fracción de volumen de suelo ocupada por poros relativamente grandes que están conectados y que permiten el flujo preferencial del agua por gravedad (Jarvis, 2007). Estos macroporos incluyen fisuras, grietas, huecos dejados por raíces o fauna, y espacios entre agregados en suelos estratificados. Son cruciales porque el agua en ellos drena rápidamente al no estar retenida por fuerzas capilares fuertes. Un suelo con alta macroporosidad tiende a tener una conductividad saturada mayor y una porosidad drenable más alta, ya que gran parte del agua almacenada puede salir libremente por esos conductos. La macroporosidad influye marcadamente en la infiltración y el drenaje: estudios señalan que pequeñas diferencias en el contenido de macroporos pueden duplicar o triplicar la tasa de infiltración básica de un suelo (Larsbo et al., 2019; Koestel & Jarvis, 2018). Este parámetro depende de la textura, densidad aparente, contenido de materia orgánica y del manejo agrícola.

En suelos con alta proporción de macroporos, la mayor parte del flujo de drenaje puede ocurrir a través de ellos, significando que el valor efectivo de K a escala de campo está controlado por la conectividad de macroporos más que por la matriz porosa fina. En suelos francos, es frecuente que la actividad biológica, las raíces, la desecación superficial o la dinámica de agregados generen poros grandes y continuos que actúan como vías de drenaje muy conductivas durante los eventos de lluvia; sin embargo, bajo condiciones húmedas estos macroporos pueden perder continuidad o cerrarse parcialmente, reduciendo la conductividad hidráulica. La literatura indica que en suelos francos y arcillosos, el drenaje depende no solo de la textura sino del grado de macroporosidad y de la continuidad de estos poros grandes (Hu et al., 2021; Jarvis, 2007). Esto plantea un reto para el diseño de drenaje, ya que propiedades como K y μ pueden variar estacional y espacialmente según las características hidráulicas del suelo. En consecuencia, una caracterización adecuada de la macroporosidad es esencial para evaluar la capacidad de drenaje de un suelo; no basta con conocer la textura o la conductividad en laboratorio, sino también cómo se comporta la estructura a escala de campo.

Funciones de pedotransferencia (FPT). Dada la dificultad y costo de medir directamente parámetros hidráulicos en todas las parcelas, se han desarrollado modelos de estimación conocidos como funciones de pedotransferencia. Las FPT emplean datos edáficos de fácil obtención como la distribución granulométrica (arena, limo, arcilla), la densidad aparente, el contenido de materia orgánica, etc. para inferir las propiedades hidráulicas del suelo mediante relaciones empíricas o semi-empíricas. En el contexto del drenaje, existen FPT que predicen la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) y la porosidad drenable a partir de esas características básicas. Un ejemplo es el modelo ROSETTA, que a través de redes neuronales y bases de datos globales puede estimar la curva de retención y K_{sat} de un suelo a partir de su textura y densidad (Zhang y Schaap, 2017). Las FPT representan una alternativa operativa muy útil cuando no se dispone de mediciones in situ. En años recientes, se han publicado recalibraciones y nuevos enfoques que mejoran el desempeño de las FPT y

amplían la validez de sus predicciones a rangos de suelo más diversos (Zhang y Schaap, 2017; Pachepsky y Schaap, 2014). Asimismo, se han elaborado directrices para su uso prudente en hidrología, enfatizando la necesidad de considerar la incertidumbre asociada (Marthews et al., 2024). No obstante, las FPT tienen limitaciones inherentes: suelen estar calibradas con bases de datos específicas, por lo que su exactitud disminuye fuera de los dominios de suelo y clima originales. De hecho, diversos estudios concluyen que las predicciones indirectas mediante FPT deben validarse o calibrarse localmente siempre que sea posible, especialmente en suelos agrícolas con alta heterogeneidad. Cuando se realiza una calibración local, la brecha de precisión respecto a los datos medidos puede reducirse sustancialmente o incluso eliminarse (Malota et al., 2022; Abdelbaki & Youssef, 2010). En síntesis, las FPT son herramientas valiosas, pero deben usarse con precaución: ofrecen una primera aproximación rápida de parámetros para diseño, pero no reemplazan la información experimental de campo cuando se requiere alta certeza en el diseño de obras costosas o críticas.

Heterogeneidad edáfica y representatividad de parámetros. La heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo es un hecho bien documentado. En un mismo lote agrícola pueden coexistir zonas más arenosas con otras más arcillosas; además, con la profundidad el suelo suele diferenciarse en horizontes con texturas y densidades distintas. Esta variabilidad dificulta la selección de valores "representativos" de K , μ u otros parámetros para ingresar a los modelos de drenaje. Un muestreo puntual podría no reflejar el comportamiento promedio del área drenada. Por ello, se recomienda realizar múltiples mediciones y, si es posible, utilizar valores efectivos en los modelos (Oosterbaan & Nijland, 1994). La representatividad también tiene una dimensión de escala: muchas propiedades medidas en laboratorio no capturan fenómenos a escala de campo, como el flujo preferencial por macroporos conectados. En este sentido, Skaggs et al. (2012) subrayan que para predecir adecuadamente el drenaje en campo es crucial que la caracterización hidráulica corresponda a la escala de la separación entre drenes y la profundidad afectada. Si no, se corre el riesgo de emplear en el

diseño parámetros no efectivos, lo que disminuye la fiabilidad de las predicciones. En resumen, la heterogeneidad edáfica impone límites a la aplicabilidad directa de los modelos analíticos y exige que el diseñador evalúe cuán representativos son los valores de entrada utilizados. Esto puede implicar incorporar márgenes de seguridad en el diseño o realizar estudios complementarios para entender mejor la distribución del flujo en el perfil real.

Régimen estacionario contra transitorio. En el diseño de drenaje, es importante distinguir si el criterio de diseño se basa en condiciones estacionarias o transitorias. Un diseño estacionario típicamente asume una recarga continua constante y busca que, bajo ese flujo permanente, el nivel freático se estabilice por debajo de una profundidad crítica en el punto medio entre drenes. La ecuación de Hooghoudt y otras fórmulas de flujo estable se emplean para este fin, proporcionando el espaciamiento mínimo de drenes para lograr esa condición en equilibrio. Por otro lado, un enfoque transitorio reconoce que la recarga real ocurre en eventos (lluvias intermitentes, riego) y que el nivel freático subirá y bajará en consecuencia. En este caso, es relevante estimar los tiempos de drenaje: cuánto tarda el nivel freático en descender tras un aguacero, o cuánto sube durante un evento extremo. La ecuación de Glover–Dumm u otras soluciones transitorias permiten calcular curvas de vaciado del nivel freático, y de ellas derivar, por ejemplo, el tiempo que el agua permanece dentro de la zona radicular. Un diseño óptimo podría requerir tanto garantizar un espaciamiento adecuado en estado estacionario (para evacuar infiltraciones prolongadas) como verificar que bajo eventos intensos el nivel freático desciende suficientemente rápido para no asfixiar las raíces. Por eso, en la práctica se suelen combinar ambos criterios: uno estacionario (dimensionamiento básico de espaciamiento) y uno transitorio (verificación de tiempos de respuesta del drenaje). La comparación de modelos permanentes y transitorios también es útil para dimensionar drenes en zonas con temporadas secas y húmedas.

La evaluación comparativa de parámetros hidráulicos medidos y estimados sigue siendo un tema central en el diseño óptimo de drenaje subterráneo debido al

fuerte impacto que estos valores tienen sobre la capacidad predictiva de los modelos matemáticos. El desempeño de cualquier modelo de drenaje depende de cuán fielmente los parámetros empleados, principalmente la conductividad hidráulica saturada (K) y la porosidad drenable (μ), representan la realidad física del suelo. Cuando los valores utilizados no son confiables, las predicciones de nivel freático pueden ser erróneas y conducir a decisiones inadecuadas sobre el espaciamiento y la profundidad de los drenes. Este problema persiste porque los diseñadores deben elegir entre datos experimentales locales, más precisos pero costosos y laboriosos, o valores estimados mediante funciones de pedotransferencia, más rápidos y económicos, aunque potencialmente menos exactos. La literatura señala que esta disyuntiva es especialmente relevante en suelos con alta variabilidad espacial o en proyectos de gran escala, donde la inversión en mediciones puede significar la diferencia entre un sistema funcional o uno deficiente (Skaggs et al., 2012; Nabi-Sichani & Sepaskhah, 2012). Incluso cuando se realizan mediciones directas, la dispersión de los resultados plantea el desafío de decidir cómo incorporar la variabilidad en el diseño; mientras que, en el caso de las funciones de pedotransferencia, surge la necesidad de calibrarlas con datos locales. Algunos estudios indican que, con calibración adecuada, las diferencias entre parámetros medidos y estimados pueden reducirse a niveles aceptables (Malota et al., 2022). Sin embargo, esta calibración requiere al menos un conjunto mínimo de datos experimentales. La elección de valores no representativos puede resultar en diseños sobre- o subdimensionados: una sobrestimación de K puede conducir a espaciamientos excesivos que no mantengan el nivel freático dentro de límites seguros, mientras que una subestimación incrementa innecesariamente los costos de instalación. Esto adquiere mayor relevancia ante la expansión de la agricultura de riego a zonas con datos limitados y en un contexto de cambio climático que altera los patrones de recarga. En síntesis, la literatura contemporánea coincide en que la información experimental local mejora significativamente la precisión y coherencia física de los modelos de drenaje, aunque también reconoce que las herramientas de estimación pueden ser adecuadas si se aplican dentro de su

rango de validez. Por ello, comparar críticamente parámetros medidos versus estimados resulta imprescindible para determinar cuándo es necesario invertir en mediciones detalladas y cuándo los métodos indirectos son suficientes, garantizando diseños de drenaje óptimos desde una perspectiva hidráulica, económica y de sostenibilidad.

2.4 Literatura citada

Abdelbaki, A. M., & Youssef, M. A. (2010). Assessing the feasibility of DRAINMOD application using soil hydraulic properties estimated by pedotransfer functions. En *Proceedings of the 9th International Drainage Symposium* (Paper No. CSBE100170). CSBE/SCGAB–ASABE, Québec City, Canada.

Abesh, B. F., & Hubbard, J. A. (2023). A comparison of saturated hydraulic conductivity (Ksat) estimations from pedotransfer functions (PTFs) and field

Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10, 5–78.

Castanheira, P. J. N., & Serralheiro, R. P. (2010). Impact of mole drains on salinity of a Vertisol under irrigation. *Biosystems Engineering*, 105(1), 25–33.

Crenshaw, B. A., & Santi, P. M. (2004). Water table profiles in the vicinity of horizontal drains. *Environmental & Engineering Geoscience*, 10(3), 191–201.

Dou, X., Eslamian, S., Valipour, M., & Singh, V. P. (2021). Poor-drainage-induced salinization of agricultural lands: Management strategies, challenges and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124731.

Dou, X., Valipour, M., Singh, V. P., & Eslamian, S. (2022). Soil salinization management for sustainable development: A review. *Journal of Environmental Management*, 301, 113919.

- Dupuit, J. (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables* (2a ed.). Dunod.
- Dumm, L. D. (1954). Drain spacing formula. *Agricultural Engineering*, 35, 726–730.
- FAO. (2002). *Agriculture, food and water: A contribution to the World Water Development Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Forchheimer, P. (1886). Wasserbewegung durch Boden. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 30, 1782–1788.
- Glover, R. E. (1954). Groundwater movement. En H. Rouse (Ed.), *Engineering Hydraulics* (pp. 255–290). John Wiley & Sons.
- Gupta, S., Hengl, T., Lehmann, P., Bonetti, S., & Or, D. (2021). SoilKsatDB: Global database of soil saturated hydraulic conductivity measurements for geoscience applications. *Earth System Science Data*, 13, 1593–1612.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press.
- Hooghoudt, S. B. (1940). *Bijdragen tot de kennis van enkele natuurkundige grootheden van de grond* (No. 7). Rijksuitgeverij.
- Hornbuckle, J. W., Christen, E. W., & Faulkner, R. D. (2007). Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality. *Agricultural Water Management*, 89(3), 208–216.
- Hu, X., Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2021). Modeling hourly subsurface drainage using steady-state and transient drainage equations in an agro-hydrological model. *Journal of Hydrology*, 548, 749–764.

IMTA. (2019). *Coordinación de riego y drenaje: Requerimientos y lineamientos técnicos para sistemas hidroagrícolas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Jarvis, N. J. (2007). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523–546.

Kumar, A., Mishra, S., & Singh, V. P. (2013). A new drain spacing equation based on transient flow. *Hydrological Sciences Journal*, 58(4), 933–948.

Larsbo, M., Koestel, J., & Jarvis, N. (2019). Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport. *Geoderma*, 343, 116–127.

Marthews, T. R., & otros. (2024). Hydro-pedotransfer functions: A roadmap for future development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(10), 3391–3414.

Mehdinejadani, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model for simulation of a water table profile between two parallel subsurface drains using fractional derivatives. *Computers & Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794.

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2007). A new drain spacing formula. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 694–703.

Moody, H. (1966). [Subsurface drainage design in layered soils: A transient approach]. [Referencia incompleta; completar datos bibliográficos].

Nabi-Sichani, F., & Sepaskhah, A. R. (2012). Subsurface drainage design for water table control: Application of the Glover–Dumm equation under variable recharge conditions. *Agricultural Water Management*, 104, 148–157.

Oosterbaan, R. J., & Nijland, H. J. (1994). Determinants of drain spacing. En H. P. Ritzema (Ed.), *Drainage principles and applications* (2a ed., pp. 161–204). ILRI Publication 16.

Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (Eds.). (2004). *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. Elsevier.

Pachepsky, Y. A., & Schaap, M. G. (2014). Pedotransfer functions. En Y. A. Pachepsky & W. J. Rawls (Eds.), *Development of pedotransfer functions in soil hydrology* (pp. 7–32). Elsevier.

Palacios-Vélez, O. L., Carrillo-García, M., & Ruiz-Corral, A. (2004). Modelo matemático para estimar el espaciamiento entre drenes subterráneos en régimen transitorio. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 3(2), 119–128.

Ritzema, H. P. (Ed.). (1994). *Drainage principles and applications* (2a ed.). ILRI Publication 16.

Ritzema, H. P. (2006). Drainage for agriculture. En D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 402–410). Elsevier.

SADER, FAO, & INEGI. (2021). *Diagnóstico de la salinidad de los suelos agrícolas en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Saxton, K. E., & Willey, P. H. (2005). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. En V. P. Singh & D. Frevert (Eds.), *Watershed models* (pp. 401–435). CRC Press.

Sakkas, J., & Antonopoulos, V. (1981). [Evaluation of transient drainage equations under Mediterranean conditions]. [Referencia incompleta; completar datos bibliográficos].

Schaap, M. G., Leij, F. J., & van Genuchten, M. T. (2001). Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3–4), 163–176.

Shokri, N., & Bardsley, E. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth challenge. *Soil & Water Research*, 10(1), 1–20.

Smedema, L. K., Vlotman, W. F., & Rycroft, D. (2004). *Modern land drainage: Planning, design and management of agricultural drainage systems* (1a ed.). CRC Press.

Skaggs, R. W. (1982). Field drainage: A design and evaluation model. En *Proceedings of the Specialty Conference on Irrigation and Drainage* (pp. 164–175). ASCE.

Skaggs, R. W. (1999). Drainage simulation models. En R. W. Skaggs & J. van Schilfgaarde (Eds.), *Agricultural drainage* (Agronomy Monograph 38, pp. 469–500). ASA, CSSA, SSSA.

Skaggs, R. W., & van Schilfgaarde, J. (Eds.). (1999). *Agricultural drainage* (Agronomy Monograph 38). ASA, CSSA, SSSA.

Skaggs, R. W., Brevé, M. A., & Gilliam, J. W. (1994). Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 24(1), 1–32.

Skaggs, R. W., Youssef, M. A., & Chescheir, G. M. (2012). DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1509–1522.

Torres-Guerrero, J., & otros. (2016). [Cartografía de suelos y diagnóstico de salinidad en distritos de riego de México]. [Referencia incompleta; completar datos bibliográficos].

USDA-ARS. (2008). *Drainage of agricultural lands*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. [Referencia incompleta; completar serie/publicación].

Valipour, M., Singh, V. P., & otros. (2020). Drivers of soil salinity and their correlation with climate change. *Journal of Arid Environments*, 181, 104–210.

van Beers, W. F. J. (1979). *Discharge and spacing of tile drains* (ILRI Bulletin 14). International Institute for Land Reclamation and Improvement.

van der Molen, W. H., & Wesseling, J. (1991). Water table control, drainage and subirrigation. En J. van Schilfgaarde (Ed.), *Drainage for agriculture* (2a ed., pp. 295–341). Elsevier.

van Schilfgaarde, J. (1963). Drain spacing for transient flow. *Transactions of the ASAE*, 6(2), 130–133.

Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y. A., Schaap, M. G., & van Genuchten, M. T. (2010). Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 795–820.

Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3–4), 123–150.

Yáñez-Díaz, M., & otros. (2019). [Evaluación del impacto del nivel freático y salinidad en el rendimiento de cultivos en suelos pesados bajo riego]. [Referencia incompleta; completar datos bibliográficos].

Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2017). Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, 547, 39–53.

3 REPRESENTATIVIDAD DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA SIMULACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN DRENAJE SUBTERRÁNEO CON INFORMACIÓN DEL SUELO A PARTIR DE FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA

Ángel Hernández-Facundo¹; Jorge Víctor Prado-Hernández²; Mauricio Carrillo García³
y Agustín Ruiz García⁴

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua; ²Departamento de Suelos; ^{3,4}Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México.

Resumen

El diseño eficiente de drenajes subterráneos requiere modelos matemáticos capaces de representar con precisión el flujo en distintas condiciones de suelo y configuración de drenes, empleando información edáfica de fácil obtención. En este estudio se evaluó experimentalmente el desempeño de los modelos de Hooghoudt y Glover-Dumm, frecuentemente utilizados para el diseño de drenes paralelos en régimen permanente y transitorio, tanto en su versión clásica como en una versión modificada. El modelo modificado de Hooghoudt busca mejorar la representación del flujo radial, mientras que la de Glover-Dumm incorpora el grado de heterogeneidad del suelo mediante dos parámetros de ajuste. Los ensayos se realizaron en un contenedor con un suelo heterogéneo de dos capas francas y un suelo homogéneo de una sola capa arenosa, bajo distintas configuraciones de instalación de los drenes. La conductividad hidráulica saturada y la macroporosidad de los suelos se estimaron mediante funciones de pedotransferencia a partir de la textura y la densidad aparente. En el suelo homogéneo, las versiones clásica y modificada de Hooghoudt mostraron alta precisión, con errores menores a 2 cm en la carga hidráulica a la mitad del espaciamiento de los drenes, validando el supuesto de flujo horizontal de Dupuit–Forchheimer. En contraste, el modelo clásico de Glover-Dumm mostró un pobre desempeño en estimación del perfil del nivel freático según el índice Nash–Sutcliffe (NSE), mientras que su versión modificada presentó un ajuste excelente. En el suelo heterogéneo, el modelo de Glover-Dumm modificado alcanzó los mayores valores de R^2 y NSE, con valores muy próximos a 1, mostrando clara ventaja en condiciones no homogéneas. En conjunto, las ecuaciones modificadas, especialmente Glover-Dumm, ofrecen mayor representatividad y confiabilidad para el diseño de drenajes agrícolas en suelos heterogéneos.

Palabras clave: flujo radial, índice de heterogeneidad, Hooghoudt, Glover-Dumm, Boussinesq.

Introducción

La irrigación continua sin un drenaje adecuado ha provocado que extensas áreas agrícolas del mundo se vuelvan improductivas debido al anegamiento y la salinización (Singh, 2020; Ayars & Evans, 2015). En regiones áridas y semiáridas, el drenaje subterráneo es esencial para controlar la salinidad, mientras que en zonas húmedas permite evacuar el exceso de humedad y mantener la productividad (Dou et al., 2021; Valipour, Singh, & Eslamian, 2020). En México existen aproximadamente 25.7 millones de hectáreas agrícolas, de las cuales cerca del 50 % presentan afectaciones por salinidad o sodicidad (SADER, FAO, & INEGI, 2021). Además, alrededor del 10 % de las áreas bajo riego y el 16 % de la superficie de temporal enfrentan problemas de drenaje y salinización (Namuche Vargas et al., 2019). En este contexto, el drenaje subterráneo se consolida como una estrategia clave para controlar el nivel freático y remover las sales acumuladas en el perfil edáfico, contribuyendo así a la sostenibilidad de la producción agrícola (Hornbuckle et al., 2007; Dou et al., 2022).

El diseño de drenajes subterráneos se fundamenta en modelos hidráulicos capaces de representar condiciones de flujo permanente y transitorio. Entre los más reconocidos destacan las ecuaciones de Hooghoudt (1940) y Glover–Dumm (1964), ampliamente utilizadas por su simplicidad, validación experimental y utilidad práctica (Ritzema, 1994; Oosterbaan & Nijland, 1994; Camussi et al., 2022; Rathod et al., 2020). La primera describe un flujo estacionario que combina componentes horizontales y radiales mediante el concepto de espesor equivalente, mientras que la segunda explica la evolución temporal del nivel freático tras una recarga instantánea. Sin embargo, ambas se basan en suelos homogéneos e isotrópicos, condiciones que rara vez se cumplen en campo (Talsma & Haskew, 1959; van Schilfgaarde, 1963), lo cual puede generar desviaciones significativas. Por ello, evaluar su capacidad de representación en medios edáficos con variabilidad estructural resulta esencial para definir su aplicabilidad actual en el diseño de drenajes agrícolas.

La ecuación de Hooghoudt ha sido la base del diseño de drenajes por su sencillez y precisión aceptable, incluso en suelos complejos como los Vertisoles (Camussi et al., 2022; Palacios-Vélez et al., 2004). No obstante, estudios recientes evidencian que simplifica el flujo radial y subestima el área de flujo sobre el dren, generando discrepancias entre cálculos y observaciones (Shokri & Bardsley, 2015). Para mejorar su representatividad, Mishra y Singh (2007) propusieron una versión modificada que incorpora el gradiente continuo entre flujo radial y horizontal, así como la relación entre recarga y conductividad hidráulica (R/K). Esta formulación ofrece una descripción más realista del comportamiento del nivel freático en suelos heterogéneos o de baja permeabilidad (Çimen, 2008; Elmazoghi, 2017), y ha sido reconocida por Shokri y Bardsley (2015) como una evolución moderna del diseño de drenaje subterráneo.

Por su parte, la ecuación de Glover-Dumm (Dumm, 1954; Glover & Dumm, 1964) se ha empleado de manera extendida como modelo analítico para representar el flujo no estacionario hacia drenes. Su persistencia se debe a su estructura matemática simple, versatilidad y aceptación histórica (Ritzema, 1994; Oosterbaan & Nijland, 1994; Ayars & Evans, 2015). Sin embargo, estudios recientes (Kumar et al., 2012; Kumar et al., 2013; Rathod et al., 2020) han mostrado que su aplicación puede subestimar o sobreestimar el nivel freático dependiendo del tipo de suelo, debido a supuestos de homogeneidad, isotropía y condiciones iniciales ideales (Talsma & Haskew, 1959; van Schilfgaarde, 1963).

Para mejorar su precisión, Mehdinejadani, Sadeghi, & Shayannejad (2013) propusieron una modificación fraccional que introduce un índice de heterogeneidad del suelo, permitiendo representar de manera más realista la variabilidad de la conductividad hidráulica. Su formulación fue validada teórica y experimentalmente, mostrando mayor concordancia con observaciones en suelos heterogéneos (Mehdinejadani, Sadeghi, & Shayannejad, 2013). Esta versión ha sido mencionada como mejora teórica y aplicada en trabajos recientes orientados a modelar flujos no lineales en suelos anisotrópicos (Ostad-Ali-Askari et al., 2021; Henine et al., 2022; Ghane, 2023). Sin embargo, pocas investigaciones han evaluado su desempeño en condiciones reales de campo. De hecho, el estudio de Matinzadeh et al. (2019), realizado en campos de caña de azúcar en Khuzestán, Irán, constituye una de las escasas evaluaciones comparativas entre las ecuaciones de Mishra & Singh (2007) y Mehdinejadani et al. (2013), concluyendo que la primera muestra mayor exactitud global, mientras que la segunda ofrece mejor ajuste en niveles freáticos someros.

A pesar de estos avances, gran parte de la literatura aún se centra en suelos homogéneos y en la estimación de la carga hidráulica solo en la zona media entre drenes, simplificando el fenómeno del drenaje. Estudios como los de Miles y Kitmitto (1989), Crenshaw y Santi (2004), Castanheira (2010), Malota (2015) y Vaičiukynas (2015) validaron ecuaciones de espaciamiento sin considerar la estratificación del perfil o el comportamiento lateral y vertical del flujo. Rathod et al. (2020), en su evaluación de fórmulas no estacionarias en Vertisoles, también asumieron homogeneidad del medio para fines comparativos. Esta tendencia limita la precisión del diseño y resalta la necesidad de estudios que incorporen condiciones heterogéneas y perfiles de flujo completos.

Por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar experimentalmente el desempeño hidráulico de las ecuaciones de Hooghoudt (1940) para flujo permanente y Glover-Dumm (1961) para flujo transitorio en sus versiones clásicas y en las modificaciones propuestas por Mishra y Singh (2007) y Mehdinejadani et al. (2013), en suelo homogéneo y heterogéneo sometidas a diferentes configuraciones geométricas con el fin de determinar su aplicabilidad en el diseño actual de drenaje subterráneo agrícola. Asimismo, se emplearon propiedades hidráulicas estimadas mediante funciones de pedotransferencia (PTF), las cuales han demostrado ser herramientas útiles y ampliamente aceptadas para la estimación de parámetros hidráulicos (Wösten, Pachepsky & Rawls, 2001; Vereecken et al., 2010; Pachepsky & Rawls, 2021). Este análisis permitirá valorar su precisión con base en propiedades hidráulicas del suelo obtenidas mediante PTF, contribuyendo al desarrollo de criterios de diseño más confiables y ajustados a las condiciones reales de los suelos agrícolas.

Fundamentos teóricos

El comportamiento del nivel freático en sistemas de drenaje puede describirse mediante la ecuación de Boussinesq (1904), la cual representa el flujo no estacionario en un medio poroso saturado. Al aplicar los supuestos de Dupuit-Forchheimer (DF), que consideran un flujo predominantemente horizontal y gradientes verticales despreciables, dicha ecuación se simplifica a una forma unidimensional que constituye la base teórica de las formulaciones analíticas de Hooghoudt (1940) y Glover-Dumm (1964). Estas permiten determinar la separación óptima L entre drenes paralelos en función de las propiedades hidráulicas del suelo y la configuración geométrica del sistema (Fig. 1). La ecuación unidimensional de Boussinesq es:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = K \left[\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + R \quad (1)$$

Donde h es la carga hidráulica sobre los drenes (m), K conductividad hidráulica saturada en dirección horizontal (m día⁻¹), μ porosidad drenable (adimensional), x distancia espacial (m), t tiempo (día) y R es una recarga vertical neta (m día⁻¹).

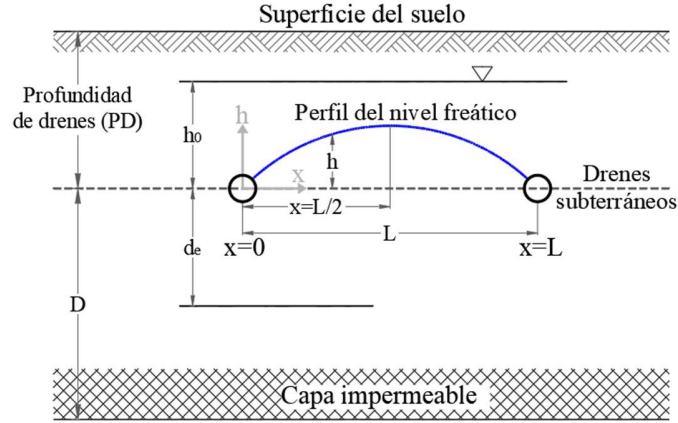


Fig. 1 Representación de un sistema de drenaje subterráneo y simbología usada en los modelos matemáticos

A partir de la ecuación de Boussinesq y las suposiciones de DF, Hooghoudt (1940) obtuvo una expresión matemática para estimar el espaciamiento entre drenes (L) en régimen permanente ($\partial h / \partial t = 0$) y recarga uniforme:

$$L^2 = \frac{8K_2 d_e h + 4K_1 h^2}{q} \quad (2)$$

donde K_1 y K_2 son las conductividades hidráulicas de los estratos superior e inferior, respectivamente, q el caudal drenado por unidad de superficie y h la carga hidráulica a la mitad del espaciamiento de los drenes. Hooghoudt implementó una profundidad equivalente (d_e) imaginaria para sustituirla por el espesor de suelo por debajo de los drenes (D) y así considerar el efecto del flujo radial cerca de los drenes con el fin de reducir el error generado en la consideración de DF de que el flujo es horizontal. Van der Molen y Wesseling (1991) simplificaron la estimación de d_e mediante una expresión analítica práctica:

$$d_e = \frac{\pi L}{8} \left[\ln \frac{L}{\pi r} \right] + f(x) \quad (3)$$

Donde r es el radio del dren (m), $x = \frac{2\pi(D)}{L}$ es un parámetro adimensional que representa la distancia vertical entre el dren y la capa impermeable. La función correctiva $f(x)$ está dada por la siguiente serie infinita:

$$f(x) = \sum_{n=1, 3, 5, 7, \dots}^{\infty} \frac{4e^{-2nx}}{n(1 - e^{-2nx})} \quad (4)$$

La ecuación de Hooghoudt tiene la restricción de que $d_e \leq D$, y se encontró que el suelo situado debajo de los drenes a una profundidad mayor o igual que $\frac{L}{4}$ no aporta flujo hacia los drenes (Ritzema, 1994).

Mishra & Singh (2007) propusieron una modificación del modelo de Hooghoudt el cual integra explícitamente el flujo radial acoplado al flujo horizontal. La carga hidráulica en la zona de flujo radial ($h(r)$) se obtiene resolviendo una ecuación implícita, en función de la separación de los drenes (L), radio de los drenes (r_0), recarga (R), conductividad hidráulica saturada (K) y el espesor de suelo saturado por debajo de los drenes (D). La carga hidráulica en la zona de flujo horizontal se obtiene con la siguiente ecuación:

$$h(x) = \left(-\frac{R}{K}x^2 + \frac{R}{K}\left(L - \frac{4D}{\pi}\right)x + (h(r_r) + D)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - D \quad (5)$$

La deducción de estas expresiones matemáticas implica que el flujo radial tiene una extensión (r_r) igual a $2D/\pi$ desde los drenes, mientras que Hooghoudt asumió una extensión igual a $D/\sqrt{2}$.

En régimen transitorio, la disipación del nivel freático entre drenes paralelos se describe con la ecuación clásica de Glover–Dumm (1961), derivada de la forma unidimensional de Boussinesq. Su versión extendida fue desarrollada por Mehdinejadani et al. (2013) mediante una formulación fraccionaria aplicable a suelos heterogéneos:

$$h(x, t) = \frac{4h_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-c_v \left(\frac{n\pi}{L}\right)^v t} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (6)$$

donde h_0 es la carga hidráulica inicial, L el espaciamiento entre drenes, y x la posición horizontal respecto a un dren. El parámetro C_v es el coeficiente de disipación de la carga, y en la ecuación original de Glover–Dumm se define como:

$$C_v = \frac{Kd_e}{\mu} \quad (7)$$

El exponente fraccionario v representa el índice de heterogeneidad o el grado de atenuación del nivel freático durante el drenaje. Para $v = 2$, la ecuación se reduce al modelo clásico de Glover–Dumm en medio homogéneo, mientras que valores menores ($v < 2$) describen condiciones heterogéneas o anisotrópicas, donde la disipación del nivel freático sigue una ley subdifusiva de orden inferior.

Una suposición fuerte en la deducción de las ecuaciones de Glover–Dumm referidas, además de las suposiciones de DF, es que la carga hidráulica respecto a la capa impermeable (h) es considerablemente mayor que las variaciones locales del nivel freático ($\partial h/\partial x$), de modo que se puede tomar h como un espesor promedio constante de la capa transmisora de agua igual a D , es decir $\partial h/\partial x = 0$ y $h \approx D$ (Ritzema, 1994).

Materiales y métodos

Modelo físico experimental

El modelo físico experimental representó el proceso de drenaje agrícola subterráneo bajo diferentes configuraciones de diseño, para en un suelo homogéneo y otro heterogéneo. Estuvo compuesto por un contenedor de suelo de paredes transparentes y los sistemas de saturación, de drenaje y de medición de la carga hidráulica (Fig. 2). El sistema de drenaje se conformó por dos drenes paralelos instalados en los extremos opuestos del lado más largo del contenedor, los cuales cumplieron con las normas de superficie de drenaje sugeridas por la FAO (2002).

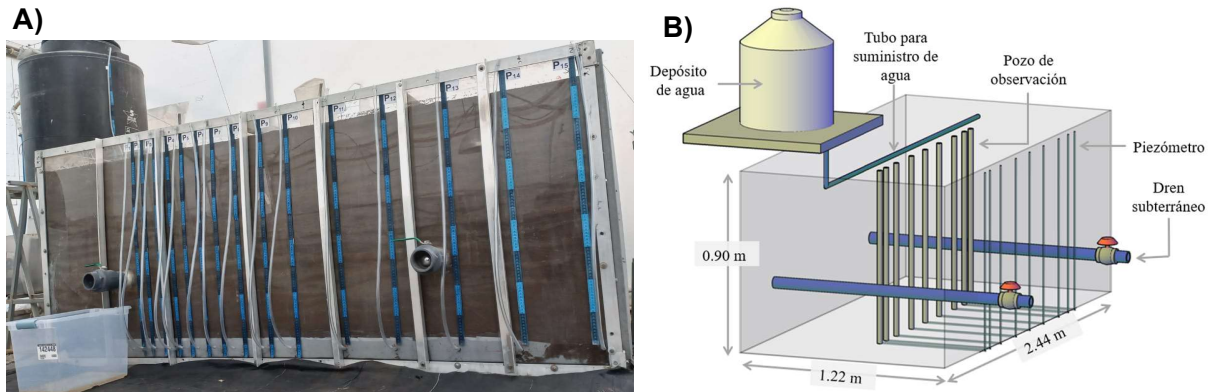


Fig. 2 Modelo físico experimental: A) Sistema real y B) Representación del sistema

El relleno del suelo se realizó por capas de 5 cm de espesor, aplicando un apisonamiento manual controlado para aproximar la densidad aparente del sitio de muestreo. La saturación inicial del medio se logró mediante un sistema de alimentación por gravedad, conformado por un depósito elevado que suministraba agua a través de un tubo ranurado.

El monitoreo de la carga hidráulica sobre los drenes (h) se realizó con pozos de observación, distribuidos a lo largo del lado más largo del contenedor entre los dos drenes. Cada pozo se conectó a un tubo piezométrico colocado a la pared exterior, lo que permitió hacer mediciones manuales precisas de la carga hidráulica. La cantidad y ubicación de los pozos variaron según el tipo de suelo empleado.

Pruebas experimentales

Suelo heterogéneo

Se definió como suelo heterogéneo al perfil conformado por dos estratos con propiedades físicas diferenciadas. El diseño experimental replicó las condiciones del perfil de suelo del predio “La Cerna”, localizado en el Campo Experimental Tlapeaxco de la Universidad Autónoma Chapingo en el Estado de México. El sitio se caracteriza por la presencia de Vertisoles, un tipo de suelo que cubre el 8.3% de la superficie de México (INEGI, 2014) y cuya distribución en zonas agrícolas representa cerca de 4.5 millones de hectáreas. Son suelos con un alto potencial productivo, pero sus propiedades físicas dificultan el manejo del nivel freático y favorecen al proceso de salinización limitando su manejo agronómico (Torres Guerrero et al., 2016; ISRIC, 2013).

Se realizaron pruebas con cuatro configuraciones de instalación de los drenes (Fig. 3, Tabla 1). La separación de los drenes en las configuraciones A2 y A4 fue de 3.84 m, pero solamente se abrió uno de ellos asumiendo simetría en el comportamiento del drenado.

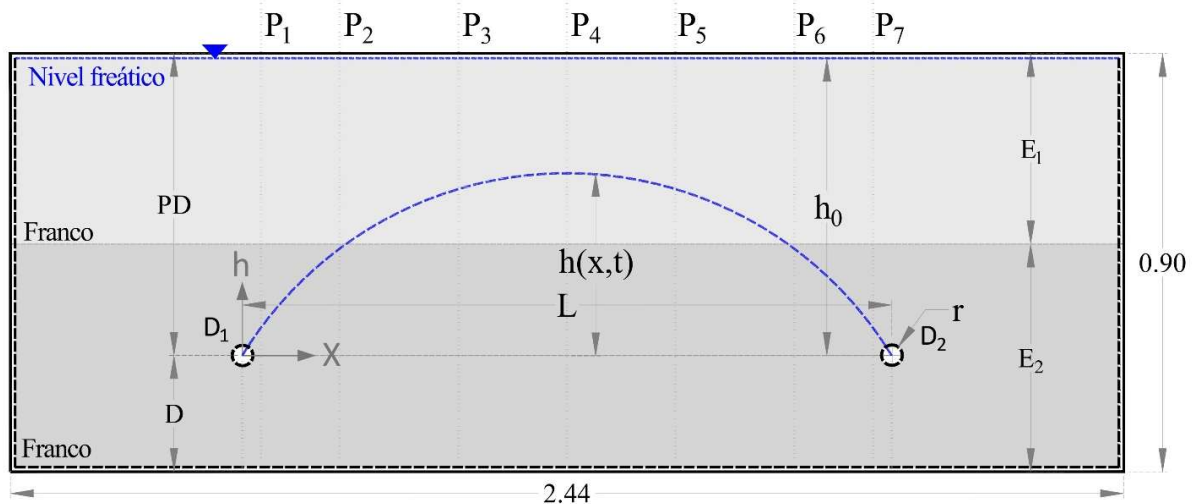


Fig. 3 Geometría y simbología usada en el sistema físico experimental para las pruebas de drenaje

Las mediciones del comportamiento espacio-temporal de la carga hidráulica se realizaron mediante siete pozos de observación (P) ubicados a distancias de 0.04, 0.21, 0.47, 0.70, 0.93, 1.19 y 1.36 m a partir del dren izquierdo (D_1).

En la configuración A1, las lecturas de la carga hidráulica se realizaron en 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14 y 17 horas después de iniciada la apertura de los drenes, mientras que en la configuración A2 se hicieron en 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14, 18, 22 y 34 horas. En las configuraciones A3 y A4 las mediciones se realizaron cada 10 minutos. Las mediciones en las configuraciones A1, A2 y A3 concluyeron cuando se estabilizó la carga hidráulica.

Tabla 1 Pruebas experimentales realizadas en suelo heterogéneo

Configuración experimental	Diámetro de los drenes D_d (mm)	Profundidad de los drenes PD (m)	Separación de los drenes L (m)	Carga inicial h_0 (m)	D (m)	Número de repeticiones	Año de observación	Tiempo de observación (h)
A1	15.8	0.65	1.40	0.65	0.25	3	2021, 2023, 2024	17.0
A2	15.8	0.65	3.84	0.61	0.25	1	2025	34.0
A3	52.0	0.55	1.40	0.45	0.35	1	2025	1.5
A4	52.0	0.55	3.84	0.51	0.35	1	2025	3.0

Con la finalidad de analizar el efecto del reacomodo del suelo sobre la distribución de la carga hidráulica, en la Configuración A1 se realizaron tres repeticiones experimentales distribuidas en distintos años. Las pruebas de las Configuraciones A2, A3 y A4 se realizaron consecutivamente en orden cronológico, con intervalos aproximados de una semana entre cada una, con el estado del suelo alcanzado después de la prueba de la configuración A1 de 2024.

Suelo homogéneo

Se consideró suelo homogéneo aquel perfil compuesto por un solo estrato con propiedades físicas uniformes a lo largo de su espesor. El suelo utilizado correspondió a una textura arenosa, recolectado de una parcela agrícola ubicada en San Juan Huactzingo, Tlaxcala, México. Este tipo de suelo es de importancia agrícola en México ya que cubre el 30% de su superficie (INEGI, 2014).

Se realizaron pruebas con dos configuraciones de instalación de los drenes (Tabla 2). Las mediciones del comportamiento espacio-temporal de la carga sobre los drenes se realizaron mediante 15 pozos de observación (P) ubicados a distancias de 0.06, 0.11, 0.18, 0.25, 0.32, 0.40, 0.48, 0.58, 0.70, 0.82, 1.02, 1.22, 1.42, 1.64 y 1.88 m a partir del dren izquierdo (D1). Las mediciones se hicieron cada 5 minutos hasta que se estabilizó la carga hidráulica.

Tabla 2 Pruebas experimentales realizadas en suelo homogéneo

Configuración experimental	Diámetro de los drenes D_d (mm)	Profundidad de los drenes PD (m)	Separación de los drenes L (m)	Carga inicial h_0 (m)	D (m)	Número de repeticiones	Año de observación	Tiempo de observación (h)
B1	52.0	0.54	3.84	0.47	0.37	1	2025	0.67
B2	52.0	0.54	1.40	0.47	0.37	1	2025	0.75

Parámetros hidráulicos de los suelos utilizados

La conductividad hidráulica saturada (K) se obtuvo mediante funciones de pedotransferencia implementadas en el software RETC (van Genuchten et al., 1991), a través del módulo Rosetta (Schaap et al., 2001), ya que ha mostrado predicciones confiables (Salazar et al. 2008; Elhakeem et al. 2017; Borek et al. 2021)(Tablas 3 y 4).

Tabla 3 Valores de K y μ del suelo heterogéneo obtenidos con funciones de pedotransferencia

Estrato	Espesor (m)	Textura de suelo (%)			Clasificación USDA	D_a (g cm ⁻³)	K (m día ⁻¹)	μ (adimensional)
		Arena	Arcilla	Limo				
E1A	0.41	29.64	26.36	44.00	Franco	1.22	0.2802	0.15
E2A	0.49	39.64	22.36	38.00	Franco	1.46	0.2946	0.14

Tabla 4 Valores de K y μ del suelo homogéneo obtenidos con funciones de pedotransferencia

Estrato	Espesor (m)	Textura de suelo (%)			Clasificación USDA	D_a (g cm ⁻³)	K (m día ⁻¹)	μ (adimensional)
		Arena	Arcilla	Limo				
E1B	0.91	90.00	3.00	7.00	Arena	1.54	3.630	0.378

La macroporosidad (μ) se obtuvo como la diferencia entre la humedad a saturación y la capacidad de campo, representando el volumen de poros que drenan por gravedad y controlan el movimiento del agua en el suelo. Este criterio, ampliamente aceptado (Hillel, 1998; USDA-ARS, 2008), asocia los macroporos con el drenaje rápido y la aireación posterior a la saturación. Los valores de humedad se estimaron con el software SPAW (Soil-Plant-Air-Water) del USDA-ARS, a partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla determinados en laboratorio (Saxton & Willey, 2005).

Modelos evaluados

En todas las configuraciones experimentales de drenaje se evaluaron cuatro modelos matemáticos: la ecuación clásica de Hooghoudt (Ecuación 2) y la versión modificada por Mishra & Singh (2007) (Ecuación 5), así como la ecuación clásica de Glover–Dumm (Ecuación 6) y la versión modificada por Mehdeinejadani, Sadeghi y Shayannejad (2013).

Optimización de parámetros del modelo de Glover–Dumm modificado

Para optimizar los parámetros Cv y v , se definió la función error $E(Cv, v)$ que mide la diferencia entre los valores observados de la carga hidráulica (h_i) y los estimados ($\hat{h}_i$). El procedimiento se implementó en MATLAB mediante

el algoritmo *fmicon*, incorporando restricciones para el parámetro v en el intervalo $(1.001 \leq v \leq 2]$. El valor inicial del parámetro C_v se obtuvo con la ecuación (7) y se asignó un valor inicial de 2 para el parámetro v . La función de error utilizada es:

$$E(C_v, v) = \sum_{i=1}^n [h_i - \hat{h}_i]^2 \quad (8)$$

Para minimizar la función error se empleó el método de Levenberg-Marquardt, el cual se considera un método híbrido que combina las ventajas del descenso del gradiente y del método de Gauss-Newton, ofreciendo robustez y eficiencia en problemas de optimización no lineal (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

Evaluación del desempeño de los modelos matemáticos

El desempeño los modelos matemáticos en la estimación de la carga hidráulica (h) con los modelos matemáticos se evaluó mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), la correlación producto-momento de Pearson (Coeficiente de Determinación) (R^2), y Eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE), ya que son de los estadísticos más empleados para ello (Mishra y Sing, 2007):

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\bar{h}} \quad (9)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})(\hat{h}_i - \bar{\hat{h}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{h}_i - \bar{\hat{h}})^2}} \right]^2 \quad (10)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{h}_i - h_i)^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (11)$$

donde $\hat{h}_i$ es la carga simulada (m), h_i es la carga observada (m), i representa la posición i ésima de la coordenada horizontal x , $\bar{h}$ es la carga observada promedio, $\bar{\hat{h}}$ es la carga simulada promedio y N es el número de datos de entrada.

Resultados

Suelo heterogéneo

Ecuación de Hooghoudt clásica

La Fig. 4 muestra la comparación entre los niveles freáticos observados y los simulados con la ecuación de Hooghoudt (1940) para las configuraciones A1–A4. En las configuraciones A1 y A2, correspondientes a periodos de drenado prolongados (17 h y 34 h, respectivamente), el modelo presentó una subestimación inicial de la carga hidráulica durante las primeras horas, seguida de una convergencia progresiva y un cruce de las curvas, a partir del cual se produjo una ligera sobreestimación hacia el final del ensayo (Fig. 4A y 4B). El mejor ajuste se registró en 2020 (A1), con un error absoluto de 0.033 m, mientras que en los años 2023 y 2024 fue de 0.108 m y 0.065 m, respectivamente. En la configuración A2, la sobreestimación final fue de 0.109 m.

En las configuraciones A3 y A4, con tiempos de observación más cortos (1.5 h y 3 h), se evidenciaron diferencias más marcadas entre los valores simulados y medidos. En estos casos, el modelo sobreestimó la carga hidráulica, efecto atribuido al reacomodo del suelo y al incremento del diámetro del dren (de 15.8 a 52.0 mm), lo que aumentó el caudal de salida y, en consecuencia, la carga calculada con la ecuación de Hooghoudt. Los errores absolutos finales fueron de 0.29 m para A3 y 0.81 m para A4.

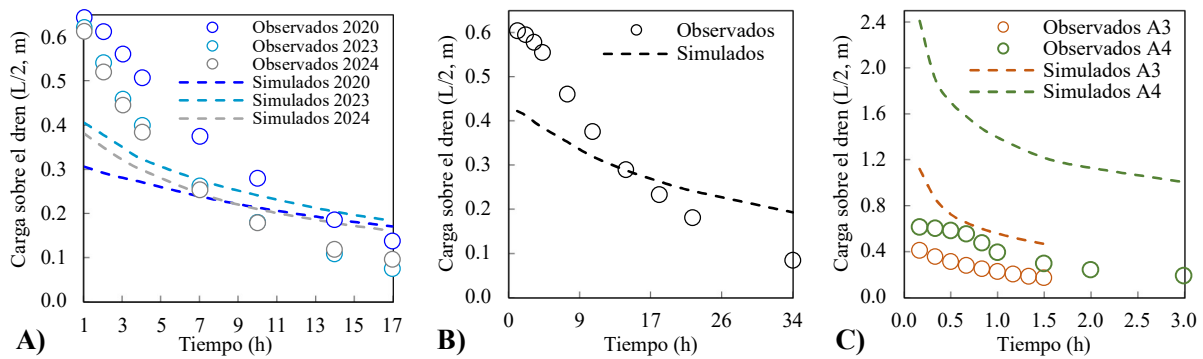


Fig. 4 Carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt clásico a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) a partir del caudal drenado observado: A) configuración A1, B) configuración A2, C) configuraciones A3 y A4

Ecuación de Hooghoudt modificada

La ecuación modificada de Hooghoudt permitió estimar el perfil espacial de la carga hidráulica y distinguir las zonas de flujo radial y horizontal. En la Configuración A1, las cargas medidas y calculadas en el punto medio entre drenes ($L/2$) fueron de 0.137 y 0.159 m en 2020, 0.074 y 0.171 m en 2023, y 0.095 y 0.150 m en 2024, con errores relativos de 16.05 %, 131.08 % y 57.89 %, respectivamente (Fig. 5A, 5B y 5C).

En todos los casos, el modelo reprodujo adecuadamente la forma general del perfil hidráulico, aunque presentó una sobrestimación sistemática en la zona de flujo horizontal. La discrepancia fue más pronunciada en 2023, moderada en 2024 y con mayor correspondencia en 2020.

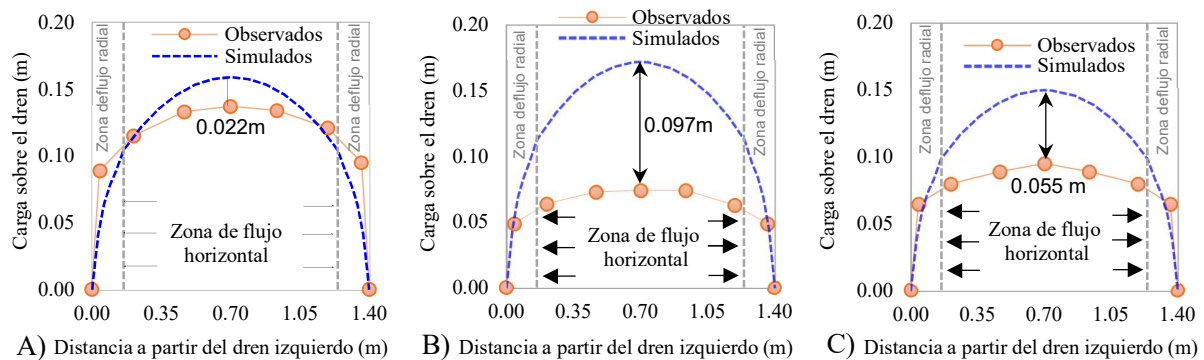


Fig. 5 Perfiles de carga hidráulica observada y simulada con el modelo Hooghoudt modificado para la configuración A1 del suelo heterogéneo, de los años: A) 2020, B) 2023 y C) 2024.

En la Configuración A2 (Fig. 6A), la carga hidráulica observada en el punto medio entre drenes fue de 0.086 m, mientras que la calculada alcanzó 0.310 m, con una diferencia absoluta de 0.223 m y un error relativo de 260.46 %. El modelo mostró una sobrestimación generalizada tanto en la zona de flujo horizontal como en la radial (Fig. 6). En la Configuración A3 (Fig. 6B), las cargas observada y calculada fueron de 0.165 m y 0.434 m, respectivamente, con una diferencia de 0.269 m y un error relativo de 163.03 %. En la Configuración A4 (Fig. 6C), los valores fueron de 0.480 m y 0.992 m, con una diferencia de 0.512 m y un error relativo de 106.67 %. En las configuraciones cortas A3 y A4 el modelo sobrestimó la carga hidráulica en todas las zonas de flujo, aunque mantuvo la forma general del perfil simulado, consistente con las configuraciones A1 y A2.

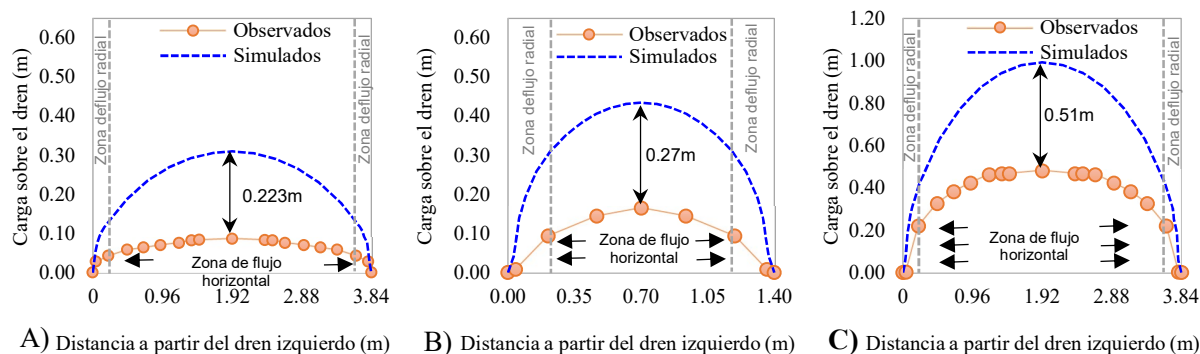


Fig. 6 Perfiles de carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt modificado para el suelo heterogéneo, configuraciones: A) A2 (34 h), B) A3 (1.5 h) y C) A4 (3 h).

Ecuación de Glover-Dumm clásico

La ecuación de Glover-Dumm (1964) permitió simular el comportamiento espacio-temporal del nivel freático bajo condiciones de flujo transitorio. En este caso, se analizó tanto la evolución del perfil hidráulico a lo largo del espacio entre drenes como su variación con el tiempo. En la Fig. 7 se presenta el comportamiento de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ($L/2$), mostrando la comparación entre los valores observados y simulados en diferentes años de la configuración A1. Se observó un mejor ajuste inicial durante las primeras horas de drenado en 2020, mientras que en los años posteriores la curva simulada tendió a sobrestimar ligeramente los valores observados en las etapas finales de drenaje.

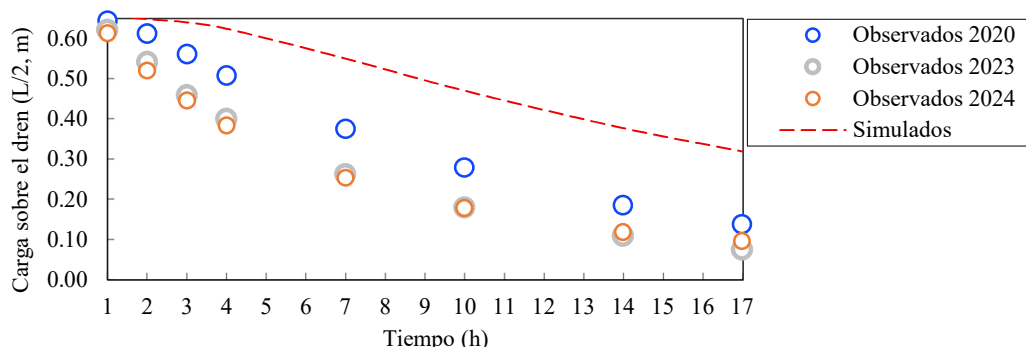


Fig. 7 Carga hidráulica observada y calculada con el modelo de Glover-Dumm clásico a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) en la configuración A1 del suelo heterogéneo.

Los resultados de desempeño estadístico para las Configuraciones A1-A4 se resumen en el Tabla 5. El modelo de Glover-Dumm clásico mostró una sobrestimación de la carga hidráulica en la parte central entre drenes y una subestimación en la zona próxima a los mismos. Este comportamiento refleja una variación espacial del gradiente de flujo, asociada al predominio del flujo radial y a la influencia del diámetro del dren, donde diámetros mayores redujeron la magnitud de la sobrestimación observada. El mejor ajuste global se alcanzó en la Configuración A4 una alta correspondencia entre los valores observados y calculados.

Tabla 5 Estadísticos del desempeño de la carga hidráulica espacio-temporal con el modelo de Glover-Dumm clásico en el suelo heterogéneo

Configuración	Año	C_v	ν	RMSE	R^2	NSE
A1	2020	0.2396	2	0.181	0.719	0.391
A1	2023	0.2396	2	0.176	0.701	0.309
A1	2024	0.2396	2	0.168	0.727	0.264
A2	2025	0.3611	2	0.195	0.659	0.122
A3	2025	0.3715	2	0.170	0.902	-1.230
A4	2025	0.5399	2	0.059	0.974	0.914

Ecuación de Glover-Dumm modificada

En la Configuración A1, la carga hidráulica medida cerca de los drenes mostró mayor desajuste respecto al resto del perfil durante todo el periodo de observación (Fig. 8). En la zona central entre drenes, el modelo reprodujo bien el comportamiento inicial (primeras 3 h), pero subestimó los valores observados en las últimas dos horas. Este patrón se mantuvo en los tres años analizados, con el mejor ajuste en 2024. La discrepancia cerca de los drenes también podría relacionarse con la resistencia hidráulica localizada asociada al diámetro del dren (15.8 mm).

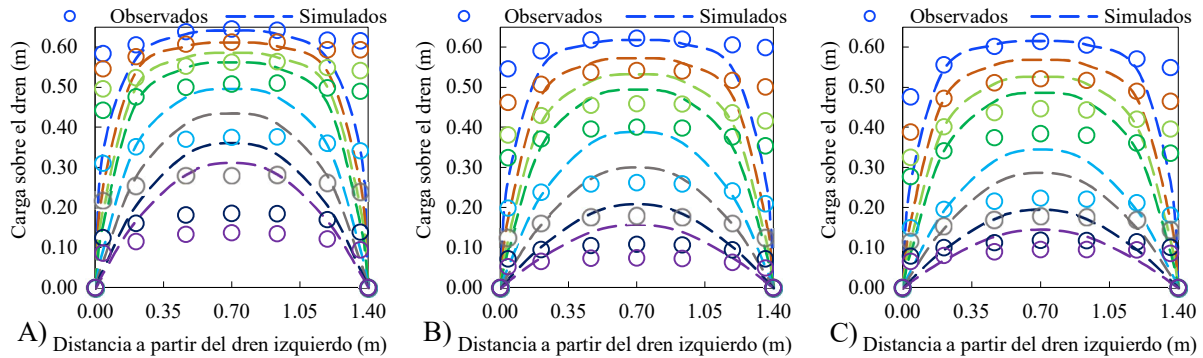


Fig. 8 Evolución espacio-temporal de la carga observada y simulada con la ecuación de Glover-Dumm modificada, para la configuración A1 del suelo heterogéneo, de los años: A) 2020, B) 2023, C) 2024.

La evolución temporal del nivel freático simulada con la ecuación de Glover-Dumm modificada en la configuración A2 mostró una tendencia general coherente con las observaciones experimentales durante las 34 horas de monitoreo (Fig. 9A). En las primeras dos horas se presentaron fluctuaciones iniciales en la carga hidráulica, manifestadas como oscilaciones de ascenso y descenso en el perfil simulado. Estas variaciones disminuyeron al incrementar el número de términos en la serie de la solución, mejorando la estabilidad numérica y la representación del flujo. La separación entre drenes (3.84 m) contribuyó a reducir la resistencia al flujo en sus proximidades.

Aunque se observó una mejor correspondencia global respecto a la configuración anterior, persistieron diferencias localizadas cerca de los drenes, mientras que en la parte central del perfil el modelo mostró una representación más estable y precisa. En las últimas horas, el modelo tendió a sobrestimar la carga hidráulica en el centro y a ajustarse con mayor exactitud cerca de los drenes.

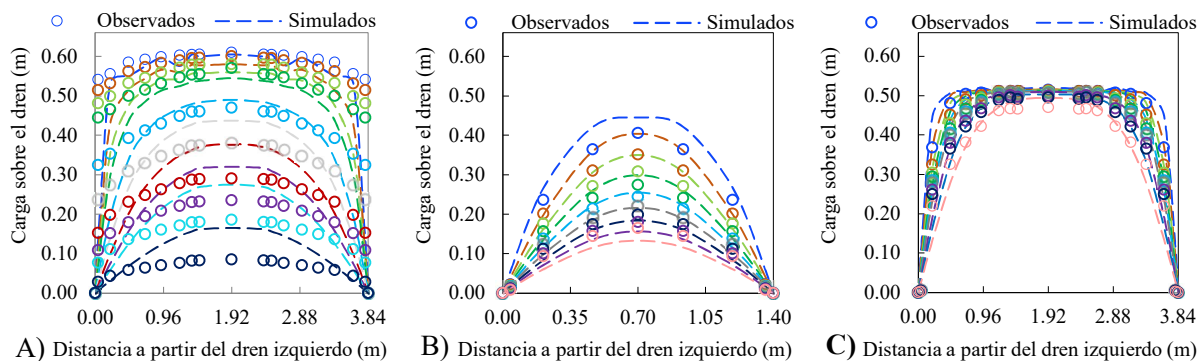


Fig. 9 Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con la ecuación de Glover-Dumm modificada, para las configuraciones: A) A2 (34 h), B) A3 (1.5 h) y C) A4 (3 h).

En los ensayos de menor duración configuración A3 y A4 (1.5 h y 3 h; Fig. 9B y 9C), el modelo mantuvo la tendencia general de ajuste con los datos observados. Durante las etapas iniciales se registró una sobrestimación de la carga hidráulica en la zona media entre drenes, seguida de una ligera subestimación hacia el final de las pruebas. En las proximidades de los drenes, la sobrestimación fue constante pero moderada. La configuración con $t = 3$ h presentó el mejor ajuste global, con una reducción significativa de las diferencias de carga y una mayor correspondencia espacial y temporal entre los valores simulados y medidos.

El resumen de los indicadores estadísticos correspondientes a las Configuraciones A1-A4 se presenta en la Tabla 6. En general, los resultados muestran que el modelo de Glover-Dumm modificado presentó una buena correspondencia espacio-temporal entre los valores simulados y observados del nivel freático. El mejor ajuste global del modelo se obtuvo en la Configuración A4, con un coeficiente de correlación R^2 de 0.9887 y un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.9761, seguidos de la Configuración A3.

Tabla 6 Estadísticos del desempeño en la estimación de carga hidráulica espacio-temporal con el modelo de Glover-Dumm modificado para el suelo heterogéneo

Configuración	Año	C_v	ν	RMSE	R^2	NSE
A1	2020	0.585	1.001	0.129	0.845	0.688
A1	2023	1.037	1.001	0.112	0.862	0.719
A1	2024	1.091	1.001	0.092	0.893	0.770
A2	2025	1.293	1.001	0.108	0.874	0.731
A3	2025	4.645	2.000	0.023	0.986	0.961
A4	2025	1.844	1.827	0.031	0.989	0.976

Suelo homogéneo

Ecuación de Hooghoudt clásico

La Configuración B1 mostró un comportamiento similar al del suelo heterogéneo, con una subestimación inicial de la carga hidráulica que convergió alrededor de $t = 0.5$ h (Fig. 10A). Este resultado confirma que la ecuación de Hooghoudt representa mejor el flujo en régimen permanente, cuando el sistema alcanza estabilidad. El error absoluto final fue de 0.028 m, evidenciando un ajuste aceptable bajo las condiciones experimentales evaluadas. En la Configuración B2, el modelo presentó una ligera subvaloración de la carga hidráulica (Fig. 10B). A pesar del corto periodo de observación, se observó una alta concordancia entre los valores simulados y medidos, especialmente al aproximarse a condiciones de flujo estable. El error absoluto final (0.003 m) indica un ajuste satisfactorio del modelo en el suelo homogéneo.

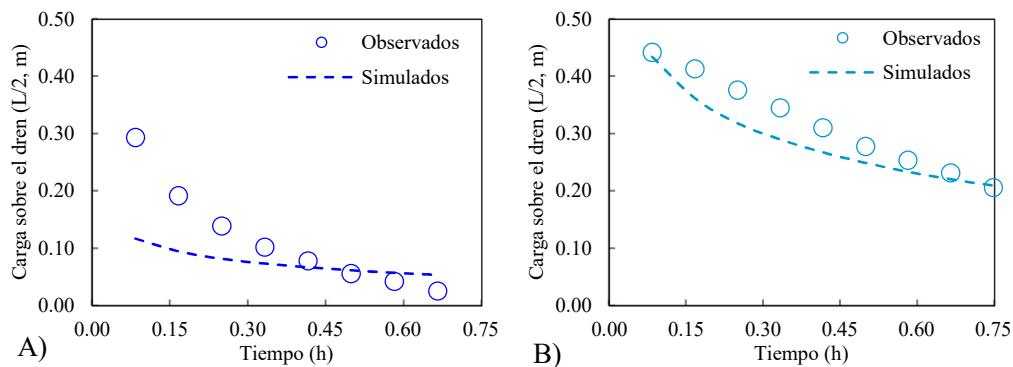


Fig. 10 Carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt clásico a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) en el suelo homogéneo, en las configuraciones: A) B1 y B) B2.

Ecuación de Hooghoudt modificado

En la Configuración B1, la carga hidráulica observada en el punto medio entre drenes ($L/2$) fue de 0.033 m, mientras que la simulada alcanzó 0.049 m, con una diferencia de 0.016 m y un error relativo de 48.48 % (Fig. 11A). El modelo mostró una buena correspondencia general, aunque sobrestimó ligeramente la carga a lo largo del perfil, manteniendo la forma y distribución del flujo observadas en la configuración anterior. En la Configuración B2, las cargas observada y simulada fueron de 0.206 m y 0.207 m, con una diferencia de 0.001 m y un error relativo de 0.48 %, lo que evidencia un ajuste sobresaliente y una excelente concordancia entre los valores experimentales y calculados (Fig. 11B).

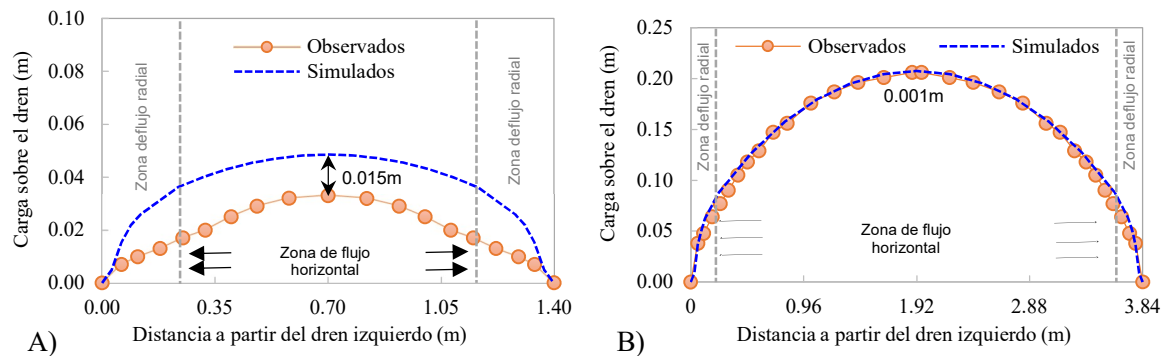


Fig. 11 Perfiles de la carga hidráulica observada y calculada con el modelo Hooghoudt modificado para el suelo homogéneo, configuraciones: A) B1 y B) B2.

Ecuación de Glover-Dumm clásico

La evolución de la carga hidráulica en la parte media de la separación entre drenes ($L/2$) muestra un descenso rápido de acuerdo con los datos observados, mientras que las simulaciones obtenidas con el modelo clásico de Glover-Dumm tienden a sobreestimar los valores de la carga (Fig. 12). El error absoluto al finalizar la prueba resultó de 0.264 m para B1 y 0.413 m para B2.

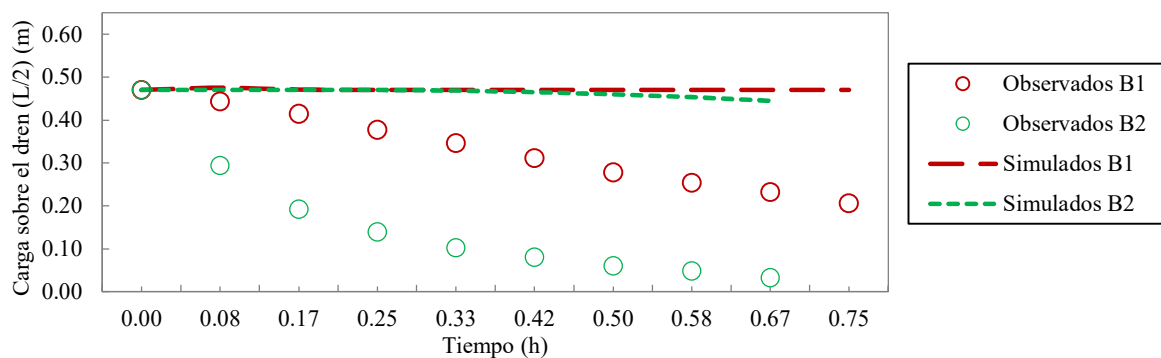


Fig. 12 Carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm clásico en las configuraciones B1 y B2 del suelo homogéneo.

Los resultados de desempeño estadístico del modelo de Glover-Dumm clásico, correspondientes a las Configuraciones B1 y B2 para el suelo homogéneo se presentan en la Tabla 7. El modelo mostró una tendencia a sobrevalorar la carga hidráulica en la parte central entre drenes y a subvalorarla en las zonas próximas a los mismos. En ambas configuraciones, los valores de los índices de eficiencia (NSE) fueron negativos, lo que refleja una baja correspondencia global entre los valores simulados y observados, aunque el modelo mantuvo la forma general del abatimiento del nivel freático a lo largo del tiempo.

Tabla 7 Estadísticos del desempeño espacio-temporal del modelo de Glover-Dumm clásico para un suelo homogéneo

Configuración	Año	C_v	ν	RMSE	R^2	NSE
B1	2025	1.803	2	0.258	0.623	-10.53
B2	2025	2.687	2	0.167	0.815	-1.05

Ecuación de Glover-Dumm modificado

En la Configuración B1, el modelo subestimó la carga hidráulica cerca de los drenes durante todo el periodo (Fig. 13A). En el punto medio ($L/2$), el error absoluto pasó de 0.056 m al inicio a 0.010 m al final, reflejando un ajuste adecuado del modelo. La Configuración B2 mostró un excelente acuerdo entre valores simulados y observados, tanto cerca de los drenes como en $L/2$ (Fig. 13B). En este punto, los errores absolutos fueron de 0.0002 m al inicio y 0.004

m al final, evidenciando alta precisión. Se mantuvo la tendencia de sobrestimación y subestimación alternadas, aunque con errores mínimos.

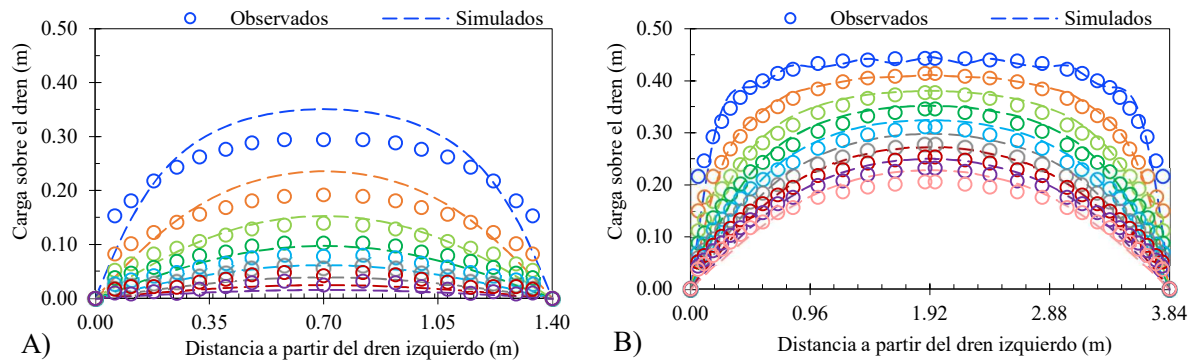


Fig. 13 Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con la ecuación de Glover-Dumm para el suelo heterogéneo, configuraciones: A) B1 y B) B2.

Al comparar los indicadores estadísticos de la configuración B1 y B2 (Tabla 8) se confirma una consistencia espacio-temporal entre los valores simulados y observados de la carga hidráulica. Los valores del parámetro v se mantuvieron próximos a 1.0, mientras que los coeficientes C_v fueron relativamente altos, lo que indica la necesidad de analizar con mayor detalle los factores involucrados en su estimación.

Tabla 8 Estadísticos del desempeño de la carga hidráulica espacio-temporal del modelo de Glover-Dumm modificada en el suelo homogéneo

Configuración	Año	C_v	v	RMSE	R^2	NSE
B1	2025	59.385	1.001	0.022	0.983	0.918
B2	2025	35.801	1.001	0.023	0.988	0.961

El mejor ajuste global se registró en la Configuración B2, con un coeficiente de correlación R^2 de 0.988, un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.961 y RMSE de 0.023.

Discusión

Hooghoudt clásico

En el suelo heterogéneo (A1–A4), el modelo de Hooghoudt clásico reprodujo la morfología del perfil freático pero sobreestimó su magnitud en fases medias y finales del drenaje (error absoluto típico de 0.17–0.81 m), especialmente cuando $D < L/4$ y hubo gradientes verticales relevantes. La inclusión de la profundidad equivalente (d_e) en el modelo de Hooghoudt permitió mejorar parcialmente la representación del flujo radial; sin embargo, dicha consideración resultó insuficiente para describir escenarios con alta variabilidad de la permeabilidad o con drenes de gran diámetro.. Estos comportamientos concuerdan con observaciones previas sobre los límites de la aproximación de Dupuit–Forchheimer en medios estratificados y con la simplificación del área de flujo sobre el dren (Shokri & Bardsley, 2015).

En el suelo homogéneo (B1–B2), el modelo mostró alta precisión (errores < 0.03 m), validando sus supuestos de medio uniforme y flujo horizontal predominante; resultados consistentes con validaciones históricas y recientes (Ritzema, 1994; Skaggs et al., 2012; Camussi et al., 2022). En conjunto, el desempeño confirma que la ecuación clásica funciona muy bien en condiciones cercanas al ideal, pero pierde representatividad bajo heterogeneidad vertical.

Hooghoudt modificado

En el heterogéneo, la versión modificada redujo el sesgo frente al clásico (típicamente 30–40 % menos error), destacando A4 (de 0.81 m a 0.51 m en la discrepancia final). La mejora provino de representar de forma continua el gradiente entre zonas radial y horizontal, con una resistencia hidráulica variable a lo largo del perfil. No obstante, en separaciones amplias ($L = 3.84$ m) persistieron desajustes en $L/2$, lo que sugiere que, aunque la modificación corrige las limitaciones del flujo radial, no resuelve por completo la transitoriedad del proceso real. Estos hallazgos son

coherentes con Çimen (2008) y Elmazoghi (2017), y con la síntesis de Shokri & Bardsley (2015) sobre la vigencia y límites de las correcciones modernas a Hooghoudt.

En el homogéneo, el desempeño fue equivalente al clásico ($RMSE < 0.02$ m), lo que evidencia consistencia: el modelo no introduce error cuando la heterogeneidad es irrelevante. En términos de diseño, la variante modificada es preferible cuando se sospecha variabilidad vertical o flujo no estrictamente horizontal, manteniendo simplicidad y buen desempeño en medios uniformes.

Glover-Dumm clásico

En el heterogéneo, el desempeño fue variable (NSE entre -1.23 y 0.91 ; $RMSE$ típica ≈ 0.16 m), con sobreestimación de la carga en fases medias/finales. El modelo es sensible a las condiciones iniciales (relación h_0-D) y a contrastes de K por estratos; cuando $h_0 \approx D$ y la heterogeneidad efectiva en la zona saturada es menor como en la configuración A4 el ajuste mejora. Estos patrones concuerdan con advertencias clásicas sobre gradientes verticales y estados iniciales no ideales (Talsma & Haskew, 1959; van Schilfhaarde, 1963).

En el homogéneo, pese al medio uniforme y a una geometría ideal, el modelo falló en reproducir la rápida caída del nivel freático (NSE negativo; $RMSE \approx 0.17-0.26$ m). La alta K y la rápida aireación con centraron el gradiente cerca del dren, acelerando el descenso del nivel freático mucho más de lo previsto por el modelo; fenómeno señalado también por Ayars & Evans (2015). En síntesis, el modelo Glover-Dumm clásico es adecuado en suelos homogéneos con K moderada, pero resulta impreciso en condiciones de alta permeabilidad o heterogeneidad que generan drenajes más rápidos.

Glover-Dumm modificado

En el suelo heterogéneo (A1–A4), la versión fraccionaria de Glover-Dumm mostró un mejor ajuste sistemático respecto al modelo clásico, con NSE entre 0.68 y 0.98 , R^2 superiores a 0.84 y $RMSE$ promedio ≈ 0.09 m. Los exponentes fraccionarios (v) oscilaron entre 1.0 y 1.83 , indicando un comportamiento subdifusivo ($v < 2$) característico de medios estratificados o parcialmente conectados. Este rango refleja cómo la ecuación fraccionaria capta la heterogeneidad hidráulica efectiva: valores menores que 2 implican retardos en el drenaje asociados a capas menos permeables, mientras que valores cercanos a 2 representan una respuesta más uniforme del flujo. En el caso A4 ($v \approx 1.83$), la estructura del suelo y el flujo combinado radial-horizontal generaron una respuesta más lenta y progresiva, coherente con el patrón teórico descrito por Mehdinejadiani et al. (2013). Por contraste, en el drenaje rápido de A3, el modelo convergió al comportamiento clásico ($v = 2$) pero con un coeficiente C_v elevado, lo que permitió reproducir con precisión la rápida caída observada. En este contexto, C_v no puede interpretarse como una simple corrección del almacenamiento, ya que en este modelo tanto C_v como v se optimizaron simultáneamente. Por tanto, C_v actúa como un parámetro combinado de ajuste hidráulico, que integra los efectos de la conductividad hidráulica efectiva (K_e) y la porosidad drenable aparente (μ_e), reflejando la capacidad global del medio para transmitir y liberar agua bajo condiciones transitorias.

Esta interpretación es especialmente relevante porque explica por qué el modelo fraccionario pudo mejorar el ajuste sin requerir la modificación directa de K o μ . Al ser un parámetro calibrable, C_v absorbe las diferencias entre los valores teóricos estimados por PTF y los reales observados experimentalmente, reproduciendo el drenaje incluso cuando la estructura del suelo introduce anisotropías o gradientes verticales no considerados. En los casos A1 y A2, los valores de C_v ($\approx 0.6-1.3$) y de $v \approx 1.0$ reflejan una dinámica de vaciado rápida y casi lineal, dominada por el drenaje de poros interconectados en la capa superior, mientras que en A4, un v más alto (1.83) indica la presencia de capas con distinta conductividad y flujos retardados. En A3, con drenaje ultrarrápido, el modelo alcanzó $NSE = 0.96$ y $R^2 = 0.986$, mostrando que la combinación de $C_v = 4.65$ y $v = 2$ reprodujo fielmente la cinética observada. Esto sugiere que, ante flujos muy rápidos, C_v compensa principalmente la fracción del volumen drenable efectiva, mientras que v define la forma temporal de la respuesta. Esta sinergia explica por qué el modelo fraccionario logra representar tanto los descensos abruptos como los procesos retardados en medios estratificados, algo que las formulaciones clásicas no capturan adecuadamente (Matinzadeh et al., 2019; Ostad-Ali-Askari et al., 2021).

En el suelo homogéneo (B1–B2), la formulación fraccionaria corrigió completamente las limitaciones del modelo clásico ($RMSE \approx 0.02-0.03$ m; $NSE \approx 0.91-0.96$), alcanzando una correspondencia casi exacta entre cargas simuladas y observadas. Los valores de $v \approx 1.001$ son particularmente significativos: según Mehdinejadiani et al. (2013), un valor de $v = 2$ corresponde teóricamente a homogeneidad perfecta, pero en este estudio, el valor cercano a 1 describe un comportamiento lineal de primer orden, lo que sugiere que incluso en arenas aparentemente uniformes el drenaje

responde de manera más rápida y no difusiva, dominado por la descarga de poros gruesos y con una fracción limitada de almacenamiento activo. En el caso de usar K de PTF, los valores altos de C_v (35.80–59.38) reflejan reduce la porosidad drenable efectiva a aproximadamente 1–2 % del volumen total, lo que coincide con el corto periodo de drenaje (45 min). Es decir, que solo los poros macroscópicos contribuyeron efectivamente al flujo, mientras que el agua retenida en microporos permaneció inmóvil. Así, C_v absorbió de manera integral tanto la conductividad efectiva como la fracción drenada del almacenamiento, adaptando el modelo a la respuesta física real sin necesidad de modificar K o μ de forma explícita.

La coherencia entre $v \approx 1$ y los altos valores de C_v en el suelo arenoso sugiere que, aun en medios homogéneos, la cinética del drenaje puede desviarse de la difusión clásica. Esto implica que la homogeneidad estructural del medio no garantiza un comportamiento difusivo, y que la formulación fraccionaria representa mejor el drenaje cuando la descarga ocurre de manera cuasi exponencial. Este resultado refuerza la interpretación de que v controla la forma temporal del proceso (rápido o retardado) y C_v ajusta la magnitud del flujo y la capacidad efectiva de almacenamiento. En conjunto, ambos parámetros definen un marco flexible que integra variaciones no medidas de K y μ , otorgando al modelo una capacidad predictiva superior. Estudios recientes (Henine et al., 2022; Ghane, 2023) confirman esta versatilidad, destacando que la combinación de parámetros fraccionarios permite representar procesos de drenaje no lineales y anómalos, tanto en suelos estratificados como en homogéneos.

En síntesis, el modelo Glover–Dumm modificado demostró una alta capacidad adaptativa y representativa del comportamiento del nivel freático en ambos tipos de suelo. En los suelos heterogéneos, integró la interacción entre flujo radial y horizontal y representó adecuadamente la retención diferencial entre capas; en los homogéneos, reprodujo con precisión la respuesta rápida y la limitada fracción de drenaje efectiva. El parámetro C_v , al no estar restringido a un significado físico único, actúa como un coeficiente de ajuste integral que combina la influencia de K y μ , mientras que v caracteriza la naturaleza temporal del flujo. Esta combinación permite representar con realismo el drenaje subterráneo sin requerir mediciones directas de campo. Desde una perspectiva práctica, este modelo ofrece un avance teórico relevante, al proporcionar una herramienta analítica calibrable capaz de incorporar la heterogeneidad del suelo y la no linealidad del flujo, elementos que los modelos clásicos no contemplan.

Comparación entre modelos

El análisis comparativo de las configuraciones experimentales confirmó que las ecuaciones clásicas de drenaje subterráneo, como las de Hooghoudt (1940) y Glover–Dumm (1964), solo son representativas cuando se cumplen estrictamente sus supuestos teóricos. Hooghoudt clásico mostró alta precisión en el suelo homogéneo, validando su aplicabilidad bajo flujo estacionario y medio uniforme. Sin embargo, en el suelo heterogéneo presentó sobrestimaciones de hasta 0.8 m debido a la estratificación de conductividades y a la naturaleza transitoria del flujo. De manera similar, Glover–Dumm clásico, aunque formulado para flujo no estacionario, presentó ajustes erráticos fuera de su rango ideal, con errores significativos incluso en el suelo arenoso, donde no logró reproducir la rápida caída del nivel freático observada experimentalmente.

Las versiones modificadas mostraron una mejora sustancial en la capacidad de ajuste. Hooghoudt modificado (Mishra & Singh, 2007) redujo el sesgo de sobrestimación al incorporar la transición entre flujo radial y horizontal, mientras que Glover–Dumm modificado (Mehdinejadi et al., 2013) alcanzó los mejores indicadores globales de desempeño ($NSE > 0.9$; $RMSE < 0.1$ m). En este último, los parámetros fraccionarios C_v y v permitieron ajustar simultáneamente la cinética del drenaje y la fracción de agua efectivamente drenada. En suelos heterogéneos, valores de v entre 1.0 y 1.83 reflejaron comportamientos subdifusivos y la influencia de capas menos permeables, mientras que en el suelo homogéneo los valores cercanos a 1 representaron un vaciado lineal dominado por macroporos. C_v actuó como un parámetro combinado que absorbió las variaciones de K_e y μ_e , otorgando al modelo flexibilidad y capacidad compensadora frente a la incertidumbre de los parámetros derivados de pedotransferencia.

Los resultados también evidenciaron que la conductividad hidráulica y la macroporosidad no son necesariamente constantes en el tiempo. En la configuración A1, por ejemplo, la carga hidráulica fue mayor en 2020 y tendió a estabilizarse en años posteriores, lo que sugiere un reacomodo estructural del suelo tras la instalación del sistema de drenaje. Este comportamiento indica que tanto K como μ pueden variar con el paso del tiempo, afectando la respuesta hidráulica real del sistema. Si bien en este estudio se mantuvieron constantes los valores de K y μ obtenidos mediante PTF, los resultados sugieren que una medición directa o periódica de estos parámetros podría mejorar la representatividad de los modelos, especialmente en etapas posteriores a la instalación, cuando el suelo tiende a compactarse o a redistribuir sus macroporos activos. En consecuencia, los modelos matemáticos resultan

representativos solo mientras los parámetros hidráulicos reflejen adecuadamente el estado físico del suelo; de medirse K y μ reales en campo, probablemente se obtendría una correspondencia aún más estrecha entre las simulaciones y las observaciones experimentales.

En conjunto, los modelos clásicos continúan siendo útiles bajo condiciones simples y estables, pero las versiones modificadas, y en particular el modelo fraccionario de Glover–Dumm, ofrecen una representación más realista y calibrable del drenaje subterráneo. Estos resultados respaldan la tendencia actual hacia modelos híbridos y ajustables que integren la variabilidad espacial y temporal de las propiedades hidráulicas en el diseño de drenajes agrícolas (Singh, 2020; Dou et al., 2022; Ghane, 2023).

Conclusiones

Bajo condiciones de suelo homogéneo, los modelos de Hooghoudt, tanto el clásico como el modificado, reprodujeron con alta precisión el nivel freático, con errores menores a 2 cm, validando sus supuestos de flujo horizontal en medio uniforme. En contraste, el modelo Glover–Dumm clásico mostró un desempeño deficiente incluso bajo condiciones homogéneas, mientras que su versión fraccionaria, propuesta por Mehdinejadani, Sadeghi y Shayannejad (2013), alcanzó un ajuste casi perfecto ($NSE = 0.96$; $RMSE$ de 0.02 y 0.03 m) al incorporar los parámetros fraccionarios C_v y v , los cuales describen con precisión la cinética real del drenaje. En suelos heterogéneos, la ecuación clásica de Hooghoudt sobrestimó la profundidad del nivel freático y, aunque su variante modificada redujo parcialmente las discrepancias, no logró representar por completo la complejidad estratificada del flujo. Por el contrario, el modelo Glover–Dumm modificado evidenció la mayor robustez y versatilidad, adaptándose a flujos combinados radial y horizontal (v entre 1.0 y 1.83) y mostrando los mejores indicadores de desempeño (NSE hasta 0.98).

Un hallazgo relevante de esta investigación es que, en el modelo fraccionario, el coeficiente C_v no representa únicamente la porosidad drenable efectiva, sino que actúa como un parámetro combinado de ajuste hidráulico que integra la influencia de la conductividad hidráulica efectiva (K_e) y de la porosidad activa (μ_e). Esta característica otorga al modelo una capacidad compensadora natural frente a las incertidumbres de los parámetros estimados, especialmente cuando no se dispone de mediciones directas. Por su parte, el exponente v controla la forma temporal del drenaje: valores menores que 2 reflejan heterogeneidad y procesos subdifusivos, mientras que valores cercanos a 1 describen drenajes rápidos dominados por poros gruesos. Esta flexibilidad convierte al modelo fraccionario en una herramienta analítica sólida para representar tanto la heterogeneidad del suelo como la no linealidad del flujo, más allá de los límites de las formulaciones clásicas.

Los resultados experimentales demostraron además que la conductividad hidráulica del suelo no permanece constante a lo largo del tiempo, incluso bajo condiciones controladas. En la configuración A1, por ejemplo, la carga hidráulica observada fue mayor en 2020 y tendió a estabilizarse en años posteriores, lo que sugiere un reajuste estructural del suelo tras la instalación del sistema de drenaje. Este fenómeno indica que tanto la conductividad hidráulica (K) como la macroporosidad (μ) pueden variar gradualmente debido a la compactación, reconexión de poros o redistribución de macroporos activos. En consecuencia, aunque los modelos matemáticos suponen parámetros hidráulicos constantes, en la práctica deberían considerarse variaciones temporales de K_e y μ_e , especialmente durante los primeros años de operación de un sistema de drenaje. Incorporar esta dinámica en futuras evaluaciones permitiría mejorar la precisión predictiva y establecer estrategias de calibración periódica de los modelos.

En conjunto, los resultados confirman que las ecuaciones clásicas son adecuadas únicamente bajo condiciones estrictamente homogéneas, mientras que las versiones modificadas, y en especial la fraccionaria de Glover–Dumm, ofrecen una representación más realista y calibrable del drenaje subterráneo. El uso de propiedades hidráulicas derivadas de funciones de pedotransferencia sigue siendo una base válida para la parametrización inicial, pero su precisión puede mejorarse al incluir parámetros fraccionarios y considerar la evolución temporal de K y μ . De esta manera, la integración de modelos analíticos avanzados con estimaciones indirectas y mediciones periódicas de campo constituye una vía prometedora para optimizar el diseño de drenajes agrícolas, reducir la incertidumbre en la predicción del nivel freático y avanzar hacia un manejo hidráulico más eficiente y sostenible.

Agradecimientos

El autor agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico para la realización del Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, así como a la Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación y Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por el respaldo académico y las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

- Ayars, J. E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface drainage design and management in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 157, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.004>
- Borek, K., Kalisz, B., & Rolbiecki, R. (2021). Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 205, 104112. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104112>
- Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10, 5–78.
- Camussi, A., Pellissier, F., & Hamer, R. (2022). Advances in drainage design and performance evaluation for Vertisols. *Water Resources Research*, 58(7), e2021WR031233. <https://doi.org/10.1029/2021WR031233>
- Castanheira, D. (2010). Hydraulic performance of agricultural subsurface drainage systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(2), 95–104.
- Çimen, M. (2008). Modelling of subsurface drainage systems with variable soil permeability. *Irrigation Science*, 26(1), 45–53. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0067-9>
- Dou, C., Li, Z., & Singh, V. P. (2021). Global trends in agricultural drainage and salinity control. *Agricultural Water Management*, 255, 107110. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107110>
- Dou, C., Li, Z., Singh, V. P., & Eslamian, S. (2022). Drainage management for sustainable agriculture under climate variability. *Water*, 14(3), 520. <https://doi.org/10.3390/w14030520>
- Dumm, L. D. (1954). Theoretical analysis of unsteady drainage. *Transactions of the ASAE*, 12, 12–18.
- Elhakeem, A., Elbaz, A., & El-Bably, M. (2017). Assessment of Rosetta pedotransfer model for arid zone soils. *Hydrological Processes*, 31(9), 1592–1604. <https://doi.org/10.1002/hyp.11129>
- Elmazoghi, A. (2017). Improvements in Hooghoudt equation for layered soils. *Water and Environment Journal*, 31(3), 364–372. <https://doi.org/10.1111/wej.12249>
- FAO. (2002). *Drainage Design Manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ghane, E. (2023). Fractional flow models in agricultural drainage research: A review. *Journal of Hydrology*, 619, 129145. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129145>
- Glover, R. E., & Dumm, L. D. (1964). Theoretical analysis of transient flow toward parallel drains. *Transactions of the ASAE*, 7(2), 157–164.
- Henine, H., Ostad-Ali-Askari, K., & Shayannejad, M. (2022). Fractional flow and non-linear drainage in heterogeneous soils. *Hydrology Research*, 53(6), 1413–1428. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.023>
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press.
- Hornbuckle, J. W., Christen, E. W., Faulkner, R. D., & Smith, R. J. (2007). Impacts of subsurface drainage on salinity and groundwater. *Agricultural Water Management*, 92(1–2), 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.003>
- INEGI. (2014). *Edafología. Carta de suelos de la República Mexicana*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- ISRIC. (2013). *SoilGrids global soil information*. International Soil Reference and Information Centre.
- Kumar, R., Singh, D. N., & Sharma, R. (2012). Assessment of transient drainage equations for different soil types. *Irrigation and Drainage*, 61(3), 379–388.
- Kumar, R., Singh, D. N., & Sharma, R. (2013). Comparative evaluation of analytical solutions for unsteady subsurface flow. *Water Resources Management*, 27(11), 4033–4048.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164–168.

- Malota, M. (2015). Validation of drainage spacing equations in stratified soils. *Agricultural Water Management*, 156, 42–49.
- Marquardt, D. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11(2), 431–441.
- Matinzadeh, Z., Mehdinejadani, B., & Shayannejad, M. (2019). Experimental comparison of modified Hooghoudt and Glover–Dumm equations. *Irrigation Science*, 37(1), 45–59.
- Mehdinejadani, B., Sadeghi, M., & Shayannejad, M. (2013). Fractional approach to transient drainage in heterogeneous soils. *Hydrological Processes*, 27(12), 1673–1686.
- Miles, B. L., & Kitmitto, E. A. (1989). Empirical validation of drain spacing equations under field conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 44, 81–89.
- Mishra, A., & Singh, V. P. (2007). Modified Hooghoudt equation for radial and horizontal flow coupling. *Hydrological Processes*, 21(16), 2181–2189.
- Namuche Vargas, J. A., Torres Guerrero, G., & Palacios-Vélez, E. (2019). Problemas de salinidad en distritos de riego de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(5), 1023–1035.
- Oosterbaan, R. J., & Nijland, H. J. (1994). Determining the soil hydraulic conductivity by the auger-hole method. ILRI Publication 16.
- Ostad-Ali-Askari, K., Shayannejad, M., & Henine, H. (2021). Analytical modeling of non-linear flow in anisotropic soils. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69(2), 121–133.
- Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2021). Development of pedotransfer functions for soil hydraulic properties. *Vadose Zone Journal*, 20(5). <https://doi.org/10.1002/vzj2.20120>
- Palacios-Vélez, O. L., Cristóbal-Acevedo, D., Nikolskii-Gavrilov, I., & Landeros-Sánchez, C. (2004). Application of Two Drain Spacing Formula for Mexico's Humid Tropical Zone. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(1), 70–77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:1\(70\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:1(70))
- Rathod, S., Dhumal, A., & Patel, M. (2020). Evaluation of transient drainage equations for Vertisols. *Irrigation Science*, 38(4), 337–349.
- Ritzema, H. P. (1994). *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication 16.
- Saxton, K. E., & Willey, P. H. (2005). The SPAW model for soil–plant–atmosphere–water simulation. USDA-ARS.
- Salazar, O., Bravo, R., & Gutiérrez, C. (2008). Validación del modelo Rosetta en suelos agrícolas mexicanos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 14(1), 71–79.
- SADER, FAO, & INEGI. (2021). *Atlas Agroalimentario de México 2021*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Shokri, A., & Bardsley, W. E. (2015). Limitations and improvements to the Hooghoudt drainage equation. *Journal of Hydrology*, 528, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.041>
- Singh, V. P. (2020). *Hydrologic Modeling: Progress and Challenges*. Springer.
- Skaggs, R. W., Fouss, J. L., & Madramootoo, C. A. (2012). Drainage design for agricultural water management. *ASABE Monograph*, 31(12), 123–134.
- Talsma, T., & Haskew, H. (1959). Flow toward drains in layered soils. *Soil Science Society of America Journal*, 23(4), 349–354.
- Torres Guerrero, G., Palacios Vélez, E., & Ramírez Hernández, J. (2016). Manejo de Vertisoles en México. *Agrociencia*, 50(3), 287–298.
- USDA-ARS. (2008). *Soil-Plant-Air-Water (SPAW) Model Documentation*. Agricultural Research Service.

- Valipour, M., Singh, V. P., & Eslamian, S. (2020). Subsurface drainage design under heterogeneous field conditions. *Environmental Earth Sciences*, 79(5), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8884-3>
- van der Molen, W. H., & Wesseling, J. (1991). Analytical determination of equivalent depth in Hooghoudt equation. *Agricultural Water Management*, 19(3), 195–210.
- van Genuchten, M. T., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA-ARS, US Salinity Laboratory.
- van Schilfgaarde, J. (1963). Drain spacing equations for non-homogeneous soils. *Transactions of the ASAE*, 6(1), 43–48.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M., & van Genuchten, M. T. (2010). Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 795–820.
- Vaičiukynas, V. (2015). Performance evaluation of drainage equations under layered soil conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(9).

4 EFECTIVIDAD DE LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL DEL SUELO EN LA MODELACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN DRENAJE SUBTERRÁNEO

Ángel Hernández-Facundo¹; Jorge Víctor Prado-Hernández²; Mauricio Carrillo García³
y Agustín Ruiz García⁴

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua; ²Departamento de Suelos; ^{3,4}Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México.

Resumen

El drenaje subterráneo constituye una práctica esencial para mantener la productividad agrícola en regiones con exceso de humedad, controlar la salinidad del suelo y garantizar la sostenibilidad de los sistemas de riego. Sin embargo, su diseño y evaluación dependen críticamente de la precisión con que se representen las propiedades hidráulicas del suelo, en especial la conductividad hidráulica saturada (K) y la macroporosidad (μ). Este estudio evalúa la efectividad de la información experimental del suelo frente a la estimada mediante funciones de pedotransferencia (FPT) en la modelación del nivel freático. Se emplearon tres modelos matemáticos: Hooghoudt clásico, Hooghoudt modificado por Mishra and Singh y Glover–Dumm clásico. Las pruebas se hicieron en un contenedor con un perfil de suelo heterogéneo de dos capas de textura franca y en un suelo homogéneo de una sola capa arenosa, bajo diferentes configuraciones de instalación y diámetros de los drenes. Los parámetros experimentales se obtuvieron mediante ensayos de pozo barrenado y el monitoreo del volumen de suelo y agua drenado, mientras que los estimados se derivaron de FPT a través de las aplicaciones informáticas ROSETTA y SPAW. Los resultados demuestran que la información experimental incrementa significativamente la representatividad y precisión de los modelos, especialmente en el suelo estratificado. Entre los modelos analizados, Glover–Dumm reprodujo con mayor exactitud la evolución transitoria del nivel freático ($R^2 > 0.95$; $NSE > 0.85$), seguido de Hooghoudt modificado, que mejoró la representación del flujo radial. El modelo de Hooghoudt clásico resultó adecuado para el suelo homogéneo bajo régimen estacionario. Los hallazgos confirman que el uso de parámetros hidráulicos medidos localmente fortalece la coherencia física y la aplicabilidad de los modelos en el diseño de sistemas de drenaje agrícola.

Palabras clave: Hooghoudt, Glover-Dumm, Boussinesq, flujo radial, modelos matemáticos.

Introducción

La predicción del nivel freático en sistemas de drenaje subterráneo depende críticamente de la calidad con que se representen las propiedades hidráulicas del suelo, en particular la conductividad hidráulica saturada (K), la macroporosidad (μ) y los parámetros de retención de agua, que alimentan modelos como el de Hooghoudt (régimen estacionario) y Glover-Dumm (régimen transitorio), así como variantes y herramientas de simulación. La evidencia comparada muestra que, si bien los datos experimentales del suelo tienden a mejorar la precisión del modelo, las funciones de pedotransferencia (FPT) suelen ofrecer desempeños aceptables, especialmente cuando se calibran o se usan con insumos de buena calidad como ROSETTA o SSURGO, y que el contexto del sistema, el tipo de suelo, el espaciamiento de drenes, las condiciones de humedad y el clima modulan la ganancia de precisión que se obtiene con mediciones directas (Malota et al. 2022; Qi et al. 2006; Abdelbaki and Youssef 2010; Askar et al. 2024).

Medir K y μ de forma representativa a escala de campo es costoso y demandante en tiempo, y ambas propiedades presentan una alta variabilidad espacial, con implicaciones directas sobre el diseño del espaciamiento entre drenes y la predicción del abatimiento del nivel freático (Skaggs 1982; Skaggs et al. 2012; Nabi-Sichani and Sepaskhah 2012). La macroporosidad, entendida como la fracción del volumen total del suelo ocupada por poros de gran tamaño responsables del flujo preferencial, influye significativamente en la infiltración, el drenaje y la conectividad hidráulica (Jarvis 2007; Koestel and Jarvis 2018; Larsbo et al. 2019). Su variación depende de la estructura del suelo, la textura, la densidad aparente y el manejo agrícola, por lo que su efecto sobre la conductividad hidráulica puede ser determinante,

especialmente en suelos con heterogeneidad estructural o presencia de grietas (Jarvis 2007; Hu et al. 2021).

Diversos estudios han evidenciado que los valores de conductividad hidráulica saturada (K) pueden variar en un rango muy amplio, influenciados por el tipo de suelo, la textura, la estructura y la escala espacial considerada (Gupta et al. 2021; Abesh and Hubbart 2023; Marthews et al. 2024). Esta amplia variabilidad pone de manifiesto que las estimaciones indirectas mediante FPT deben validarse o calibrarse localmente, especialmente en suelos agrícolas con alta macroporosidad estructural o estratificación, como los Vertisoles, donde la dinámica de drenaje depende no solo de la textura sino también del grado de agrietamiento y de la conectividad de los poros.

Como alternativa operativa, las FPT permiten inferir parámetros hidráulicos a partir de atributos edáficos de fácil medición como la textura, la densidad aparente y el contenido de materia orgánica. En los últimos años se han publicado recalibraciones que mejoran su desempeño y la distribución de parámetros (Zhang and Schaap 2017) y hojas de ruta críticas para su desarrollo y uso seguro en aplicaciones hidrológicas (Marthews et al. 2024). Sin embargo, diversos trabajos concluyen que su precisión disminuye fuera de los dominios de calibración, y que la calibración posterior reduce o incluso elimina la brecha respecto a datos medidos (Malota et al. 2022; Abdelbaki and Youssef 2010; Askar et al. 2024).

En regiones agrícolas de México, los problemas de exceso de humedad y salinidad han incrementado la necesidad de sistemas de drenaje subterráneo más eficientes (Yáñez-Díaz et al., 2019; IMTA, 2019). Sin embargo, la limitada disponibilidad de información hidráulica local obliga con frecuencia a emplear funciones de pedotransferencia desarrolladas en otras condiciones de suelo y clima, lo que introduce incertidumbre en la modelación del nivel freático. Esta situación plantea la necesidad de valorar no solo la precisión con que los modelos reproducen el nivel freático, sino también la coherencia física y la representatividad de los parámetros que sustentan la modelación.

En este estudio, la efectividad de la información del suelo se entiende como la capacidad de los parámetros hidráulicos para representar de manera realista la dinámica del drenaje subterráneo. Este concepto integra la precisión predictiva del modelo, la coherencia física de los parámetros empleados, su representatividad espacial y los costos y tiempos asociados a su obtención. Bajo estas consideraciones, resulta indispensable examinar cómo la elección entre parámetros medidos experimentalmente y parámetros estimados mediante funciones de pedotransferencia influye en la simulación del nivel freático, especialmente en ambientes donde los procesos transitorios y la heterogeneidad del suelo controlan la evolución del potencial hidráulico.

En este contexto, el presente trabajo evalúa la efectividad de la información del suelo obtenida experimentalmente y la derivada de FPT en la modelación del nivel freático en drenaje subterráneo, aplicando tres modelos matemáticos: Hooghoudt clásico, Hooghoudt modificado (Mishra and Singh 2007) y Glover-Dumm. El estudio se desarrolló con diferentes configuraciones de instalación de drenes en dos perfiles de suelo: uno homogéneo, constituido por un estrato de textura arenosa, y otro heterogéneo, compuesto por dos estratos de textura franca.

Materiales y métodos

Modelo físico experimental

Las pruebas experimentales de drenaje se realizaron en un contenedor de paredes transparentes, provisto de pozos de observación para el registro de la evolución espacio temporal del nivel freático y de un sistema de suministro de agua para la saturación del suelo. La superficie de drenaje de la pared de los drenes se sujetó a la norma de la FAO (2002). Cada pozo se conectó a un tubo piezométrico colocado a la pared exterior, lo que permitió hacer mediciones manuales precisas de la carga hidráulica (h) sobre los drenes (Figura 1).

Con la finalidad de analizar el efecto del reacomodo del suelo sobre la distribución de la carga hidráulica, en la Configuración A1 se realizaron tres repeticiones experimentales distribuidas en distintos años. Las pruebas de las Configuraciones A2, A3 y A4 se realizaron consecutivamente en orden cronológico, con intervalos aproximados de una semana entre cada una, con el estado del suelo alcanzado después de la prueba de la configuración A1 de 2024.

Tabla 1. Pruebas experimentales.

Tipo de perfil de suelo	Configuración experimental	Diámetro de los drenes D_d (mm)	Profundidad de los drenes PD (m)	Separación de los drenes L (m)	Carga inicial h_0 (m)	D (m)	Número de repeticiones	Año de observación	Tiempo de observación (h)
Heterogéneo	A1	15.8	0.65	1.40	0.65	0.25	3	2021, 2023, 2024	17.00
Heterogéneo	A2	15.8	0.65	3.84	0.61	0.25	1	2025	34.00
Heterogéneo	A3	52.0	0.55	1.40	0.45	0.35	1	2025	1.50
Heterogéneo	A4	52.0	0.55	3.84	0.51	0.35	1	2025	3.00
Homogéneo	B1	52.0	0.54	1.40	0.47	0.37	1	2025	0.67
Homogéneo	B2	52.0	0.54	3.84	0.47	0.37	1	2025	0.75

Suelos de estudio

Parámetros hidráulicos obtenidos experimentalmente

La conductividad hidráulica saturada experimental (K_{exp}) se obtuvo en el suelo contenido en el modelo físico experimental mediante el método del pozo barrenado. El descenso del agua en los pozos se midió con una sonda HOBO MX2001®, con una resolución de décimas de milímetros, precisión de 3 mm y un rango de respuesta de 1 s a temperatura estable (Figura 3). La K_{exp} se obtuvo como un promedio de tres repeticiones realizadas una vez instalados los drenes: en el suelo heterogéneo se hicieron previo a la prueba A1 del año 2021 y en el suelo homogéneo previo a la prueba B1.



Figura 3. Medición de descenso del agua en pozo barrenado con sonda HOBO en el modelo físico experimental para la obtención de la conductividad hidráulica saturada: a) suelo homogéneo, b) suelo heterogéneo.

Tabla 2. Valores medidos de K_{exp} de los suelos usados en el estudio.

Tipo de perfil de suelo	Estrato	Espesor (m)	Textura de suelo (%)			Clasificación USDA	D_a (g cm ⁻³)	K_{exp} (m día ⁻¹)
			Arena	Arcilla	Limo			
Heterogéneo	E _{1A}	0.41	29.64	26.36	44.00	Franco	1.22	0.4057
Heterogéneo	E _{2A}	0.49	39.64	22.36	38.00	Franco	1.46	0.0928
Homogéneo	E _{1B}	0.91	90.00	3.00	7.00	Arena	1.54	5.226

La macroporosidad experimental (μ_{exp}) del suelo se determinó en el modelo físico experimental como el cociente entre el volumen de agua drenado y el volumen de suelo que lo generó durante el proceso de drenaje (Tabla 3). Este parámetro representa la fracción del volumen de suelo que puede liberar agua

gravitacionalmente cuando el nivel freático desciende, y es fundamental para modelar el almacenamiento y vaciado del acuífero en condiciones transitorias (Ritzema 2006).

Tabla 3. Valores medidos de μ_{exp} de los suelos usados en el estudio.

Tipo de perfil de suelo	Configuración experimental	μ_{exp} (Adimensional)
Heterogéneo	A1	0.055
Heterogéneo	A1	0.055
Heterogéneo	A1	0.047
Heterogéneo	A2	0.043
Heterogéneo	A3	0.040
Heterogéneo	A4	0.014
Homogéneo	B1	0.010
Homogéneo	B2	0.015

Parámetros hidráulicos estimados con FPT

La conductividad hidráulica (K_{est}) y la macroporosidad (μ_{est}) estimados con funciones de pedotransferencia se obtuvieron con el módulo Rosetta del software RETC (van Genuchten et al. 199; Schaap et al. 2001) y el módulo Soil Water Characteristics del software SPAW (Saxton and Willey 2005) (Tablas 4).

Tabla 4. Valores de K_{est} y μ_{est} de los suelos usados en el estudio, obtenidos con funciones de pedotransferencia.

Tipo de perfil de suelo	Estrato	K_{est} (m día ⁻¹)	μ_{est} (adimensional)
Heterogéneo	E _{1A}	0.2802	0.15
Heterogéneo	E _{2A}	0.2946	0.14
Homogéneo	E _{1B}	3.630	0.378

Modelos evaluados

En todas las configuraciones experimentales de drenaje se evaluaron tres modelos matemáticos: Ecuación clásica de Hooghoudt, versión de Hooghoudt modificada por Mishra and Singh (2007) y la ecuación clásica de Glover–Dumm, cuyos parámetros están referenciados en la Figura 2.

El modelo clásico de Hooghoudt (1940) resulta de la ecuación de Boussinesq y de la aplicación de las suposiciones de Dupuit-Forcheimer en régimen permanente, cuya expresión para calcular la separación de los drenes (L) es:

$$L^2 = \frac{8K_2d_e h + 4K_1 h^2}{q} \quad (1)$$

donde K_1 y K_2 son las conductividades hidráulicas de los estratos superior e inferior, respectivamente, q el caudal drenado por unidad de superficie y h la carga hidráulica a la mitad del espaciamiento de los drenes. Hooghoudt implementó una profundidad equivalente (d_e) imaginaria para sustituirla por el espesor de suelo por debajo de los drenes (D) y así considerar el efecto del flujo radial cerca de los drenes con el fin de reducir el error generado en la consideración de DF de que el flujo es horizontal. El cálculo del espesor equivalente se calculó con la ecuación de Van der Molen and Wesseling (1991):

$$d_e = \frac{\pi L}{8} \left[\ln \frac{L}{\pi r_0} \right] + f(x) \quad (2)$$

donde r_0 es el radio del dren (m), $x = \frac{2\pi(D)}{L}$ es un parámetro adimensional que representa la distancia vertical entre el dren y la capa impermeable. La función correctiva $f(x)$ está dada por la siguiente serie infinita:

$$f(x) = \sum_{n=1, 3, 5, 7, \dots}^{\infty} \frac{4e^{-2nx}}{n(1 - e^{-2nx})} \quad (3)$$

El modelo de Hooghoudt modificado por Mishra and Singh (2007) delimita explícitamente el flujo radial y el flujo horizontal. La carga hidráulica en la zona de flujo radial ($h(r)$) se obtiene resolviendo una ecuación implícita, en función de la separación de los drenes (L), radio de los drenes (r_0), recarga (R), conductividad hidráulica saturada (K) y el espesor de suelo saturado por debajo de los drenes (D). La carga hidráulica en cualquier posición x de la zona de flujo horizontal se obtiene con la siguiente ecuación:

$$h(x) = \left(-\frac{R}{K}x^2 + \frac{R}{K}\left(L - \frac{4D}{\pi}\right)x + (h(r_r) + D)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - D \quad (4)$$

La deducción de esta expresión matemática implica que el flujo radial tiene una extensión (r_r) igual a $\frac{2D}{\pi}$ desde el centro de los drenes, mientras que Hooghoudt asumió una extensión igual a $\frac{D}{\sqrt{2}}$.

La ecuación clásica de Glover–Dumm (1961), se basa en las suposiciones de DF y que la carga hidráulica respecto a la capa impermeable (h) es considerablemente mayor que las variaciones locales del nivel freático ($\partial h/\partial x$) (Ritzema 1994), para estimar el comportamiento espacio-temporal de la carga sobre los drenes, cuya expresión es:

$$h(x, t) = \frac{4h_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-C_v \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (5)$$

donde h_0 es la carga hidráulica inicial y x es la posición horizontal respecto al centro de los drenes. El parámetro C_v es el coeficiente de disipación de la carga, definido como:

$$C_v = \frac{K d_e}{\mu} \quad (6)$$

donde μ es la macroporosidad.

Evaluación del desempeño de los modelos matemáticos

El desempeño los modelos matemáticos en la estimación de la carga hidráulica (h) con los modelos matemáticos se evaluó mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), la correlación producto-momento de Pearson (Coeficiente de Determinación) (R^2), y Eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE), ya que son de los estadísticos más empleados para ello (Mishra y Sing 2007):

$$\text{RMSE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\bar{h}} \quad (9)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})(\hat{h}_i - \bar{\hat{h}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{h}_i - \bar{\hat{h}})^2}} \right]^2 \quad (10)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (11)$$

donde $\hat{h}_i$ es la carga simulada (m), h_i es la carga observada (m), i representa la posición i ésima de la coordenada horizontal x , $\bar{h}$ es la carga observada promedio, $\bar{\hat{h}}$ es la carga simulada promedio y N es el número de datos de entrada.

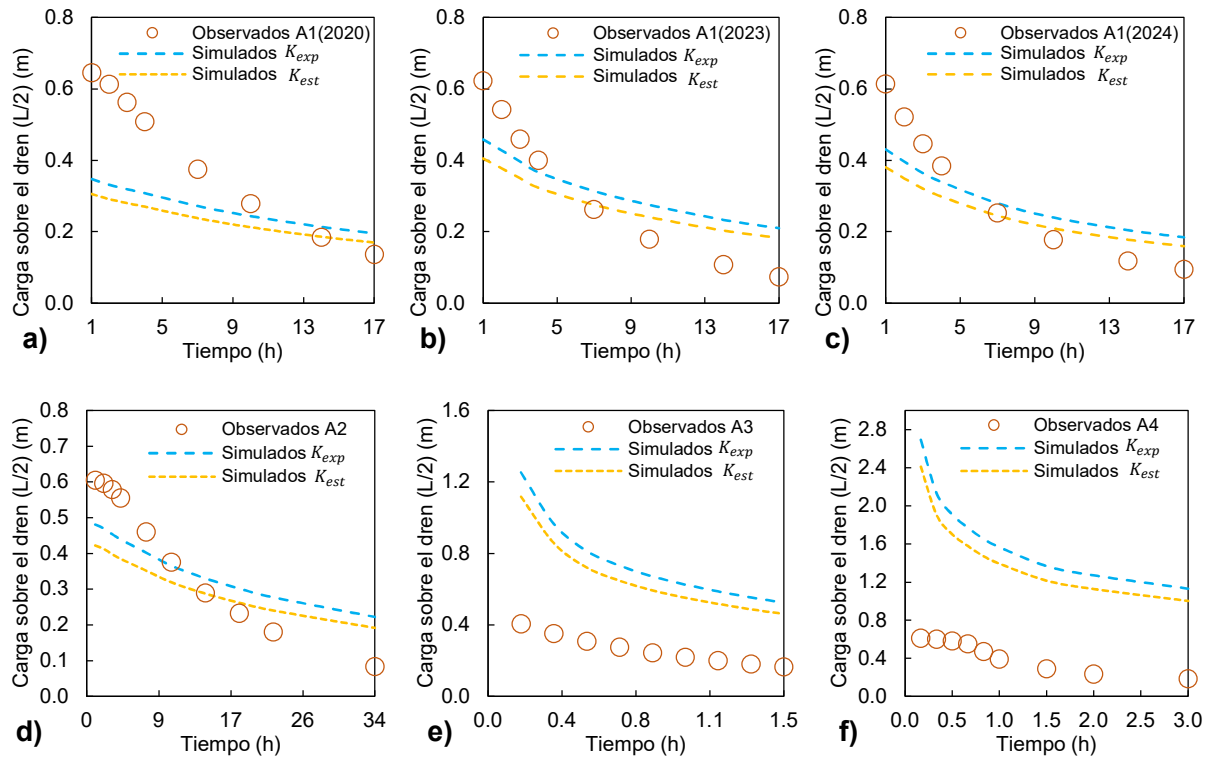
Resultados

Modelo de Hooghoudt clásico

El uso de K_{est} mejora ligeramente la aproximación respecto a los valores simulados con K_{exp} . Se mantiene la tendencia del modelo a subestimar inicial y posteriormente sobrestimar la carga hidráulica (Figura 4). En la Tabla 5 se presentan los valores del error absoluto al final de la prueba, momento en el que se considera que el sistema alcanza la condición de permanencia. El menor error en el suelo heterogéneo corresponde a la configuración A1 (0.033 m), mientras que en el suelo homogéneo se obtuvieron errores menores a 5 cm, reflejando un buen ajuste del modelo.

Tabla 5. Cargas hidráulicas a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) observadas y simuladas con el modelo de Hooghoudt clásico.

Tipo de perfil de suelo	Configuración experimental	Tiempo de observación (h)	h observada (m)	K_{exp}		K_{est}	
				h (m)	Error absoluto (m)	h (m)	Error absoluto (m)
Heterogéneo	A1	17.00	0.137	0.196	0.059	0.170	0.033
Heterogéneo	A1	17.00	0.074	0.210	0.136	0.183	0.109
Heterogéneo	A1	17.00	0.095	0.184	0.089	0.160	0.065
Heterogéneo	A2	34.00	0.083	0.222	0.139	0.192	0.109
Heterogéneo	A3	1.50	0.165	0.525	0.360	0.462	0.297
Heterogéneo	A4	3.00	0.185	1.132	0.947	1.002	0.817
Homogéneo	B1	0.75	0.033	0.038	0.005	0.053	0.020
Homogéneo	B2	0.67	0.206	0.156	0.050	0.209	0.003



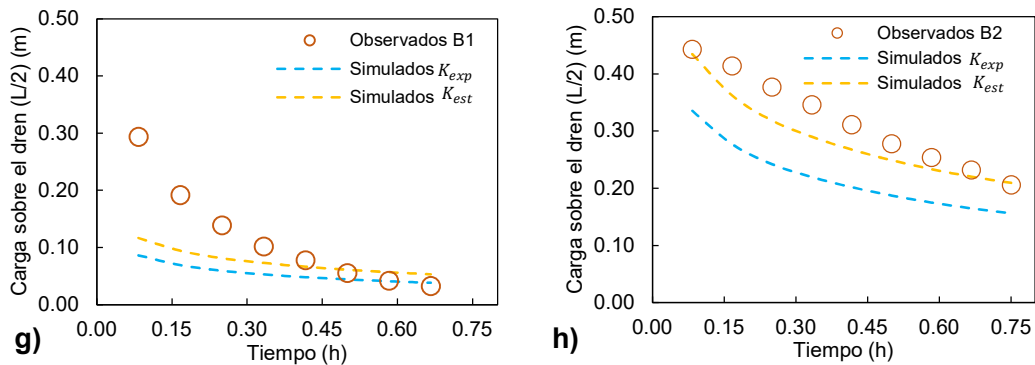


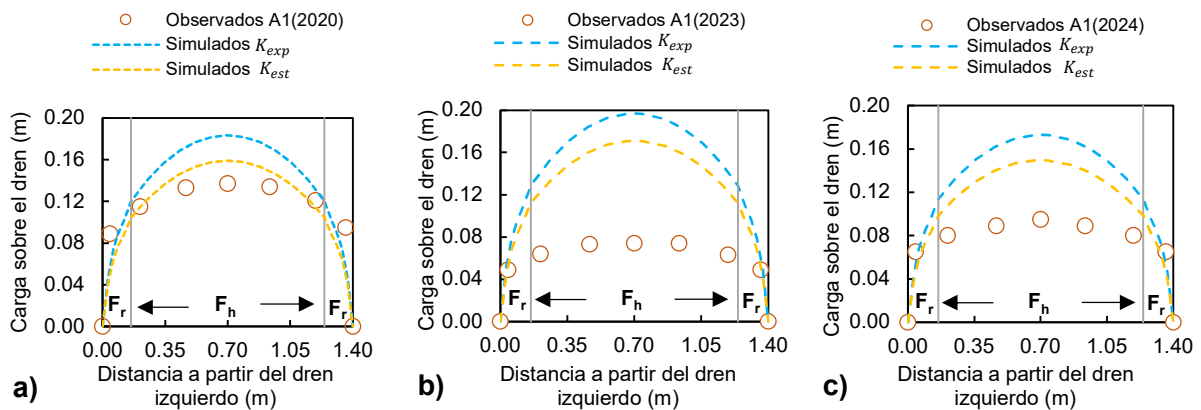
Figura 4. Carga hidráulica simulada en el suelo homogéneo y heterogéneo con la ecuación de Hooghoudt a la mitad de la separación de los drenes (L/2), de las configuraciones: a) A1:2020, b) A1:2023, c) A1:2024, d) A2, e) A3, f) A4, g) B1 y h) B2.

Hooghoudt modificado

El modelo permitió caracterizar con detalle el perfil de carga hidráulica en el momento final de las pruebas, una vez que el sistema alcanzó la condición de permanencia. En la Tabla 6 se presentan los valores del error absoluto al final de la prueba, momento en el que se considera que el sistema alcanza la condición de permanencia. De acuerdo con la Figura 5 se observa un mayor error en la zona de flujo horizontal (F_h) en comparación con la zona de flujo radial (F_r). El modelo tiende a sobrestimar la carga hidráulica, aunque presenta un mejor ajuste cuando se utiliza la conductividad hidráulica estimada por funciones de pedotransferencia (K_{est}). El menor error en suelo heterogéneo se registró en la configuración A1 (0.022 m), mientras que en el suelo homogéneo el error más bajo correspondió a la configuración B2 (0.001 m). En el suelo homogéneo se obtuvo el menor error utilizando K_{exp} , correspondiente a la configuración B1, la cual coincide con la fecha en que se realizó la medición de la conductividad hidráulica en campo.

Tabla 6. Cargas hidráulicas a la mitad de la separación de los drenes (L/2) observadas y simuladas con el modelo de Hooghoudt modificado.

Tipo de perfil de suelo	Configuración experimental	Tiempo de observación (h)	h observada (m)	K_{exp}		K_{est}	
				h (m)	Error absoluto (m)	h (m)	Error absoluto (m)
Heterogéneo	A1	17.00	0.137	0.183	0.046	0.159	0.022
Heterogéneo	A1	17.00	0.074	0.197	0.123	0.171	0.097
Heterogéneo	A1	17.00	0.095	0.173	0.078	0.150	0.055
Heterogéneo	A2	34.00	0.083	0.086	0.270	0.310	0.223
Heterogéneo	A3	1.50	0.165	0.495	0.330	0.434	0.269
Heterogéneo	A4	3.00	0.185	1.123	0.643	0.992	0.510
Homogéneo	B1	0.75	0.033	0.035	0.002	0.049	0.015
Homogéneo	B2	0.67	0.206	0.155	0.051	0.207	0.001



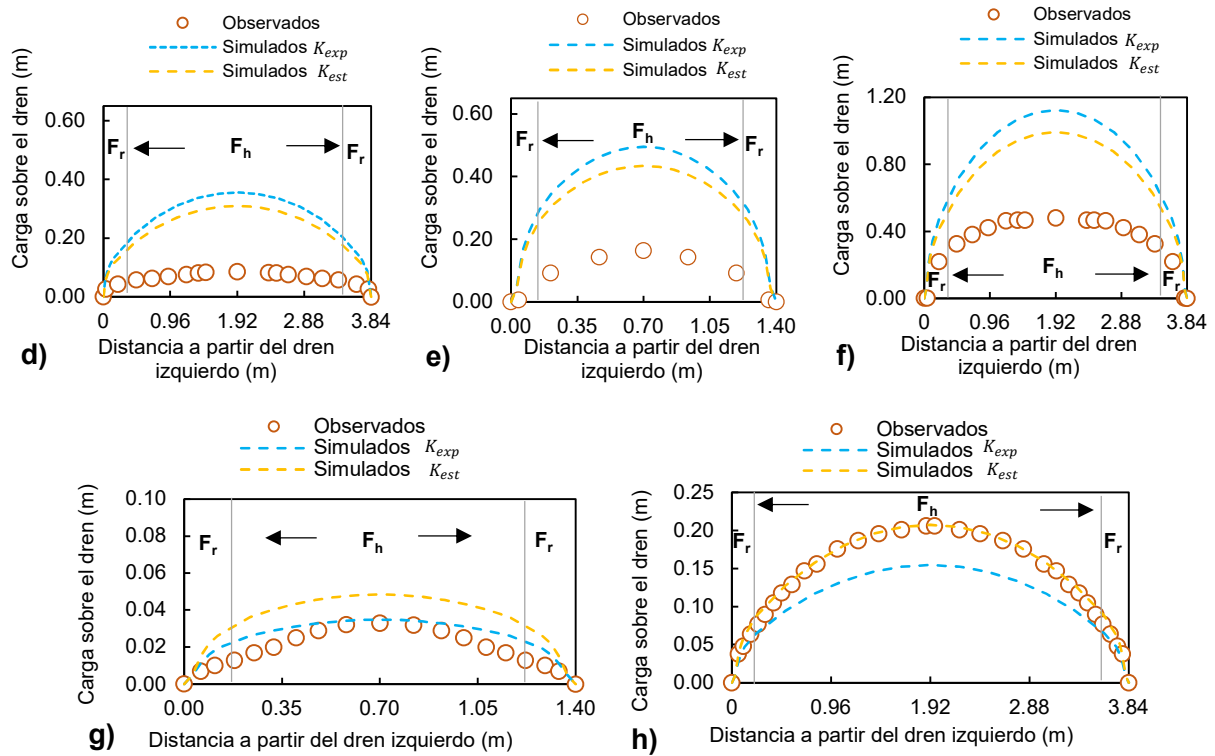
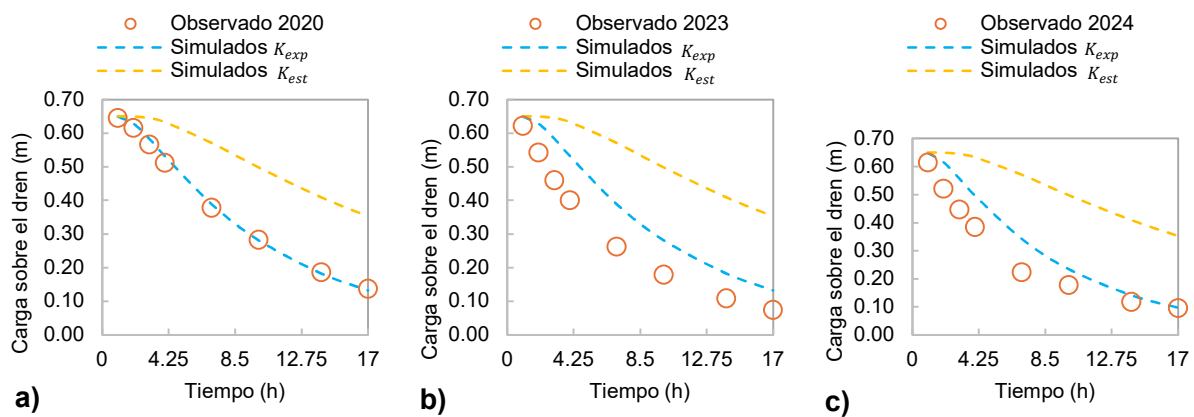


Figura 5. Carga hidráulica simulada en el suelo homogéneo y heterogéneo con la ecuación de Hooghoudt modificada, de las configuraciones: a) A1:2020, b) A1:2023, c) A1:2024, d) A2, e) A3, f) A4, g) B1 y h) B2. F_r y F_h corresponden a las zonas de aportación de flujo radial y horizontal, respectivamente.

Glover-Dumm

La carga hidráulica simulada a la mitad de la separación de los drenes mostró el mejor ajuste en la configuración A1 durante 2020, coincidiendo con el periodo en que se midió experimentalmente la conductividad hidráulica (Figura 6a).



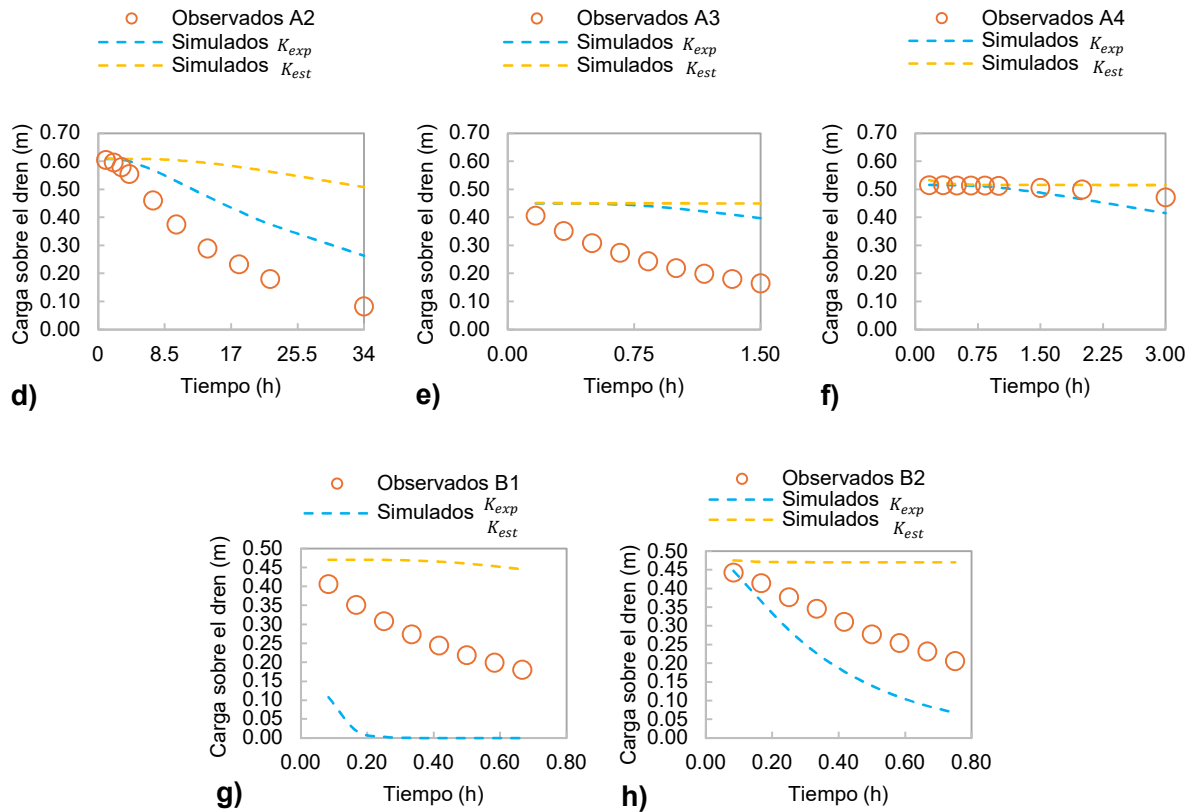


Figura 6. Carga hidráulica simulada en el suelo homogéneo y heterogéneo con la ecuación de Glover-Dumm a la mitad de la separación de los drenes ($L/2$), de las configuraciones: a) A1:2020, b) A1:2023, c) A1:2024, d) A2, e) A3, f) A4, g) B1 y h) B2.

El modelo de Glover–Dumm también permitió simular de manera detallada la evolución espacio-temporal de la carga hidráulica a lo largo del perfil. En la configuración A1 (2020), el ajuste con datos experimentales mostró buena correspondencia en la parte media del perfil, pero se observaron errores cerca de los drenes (Figura 7a, 7b y 7c). Al incrementar el diámetro de los drenes de 15.8 en A1 a 52.0 mm en la configuración A3, el modelo representó con mayor precisión el comportamiento hidráulico en esa zona (Figura 8a, 8b y 8c), aunque persistió un desajuste en la parte media, posiblemente asociado al reacondicionamiento del suelo. Mientras que las simulaciones con parámetros estimados mediante funciones de pedotransferencia tendieron a sobrestimar la carga en la parte media y a subestimarla cerca de los drenes (Figura 7 y Figura 8).

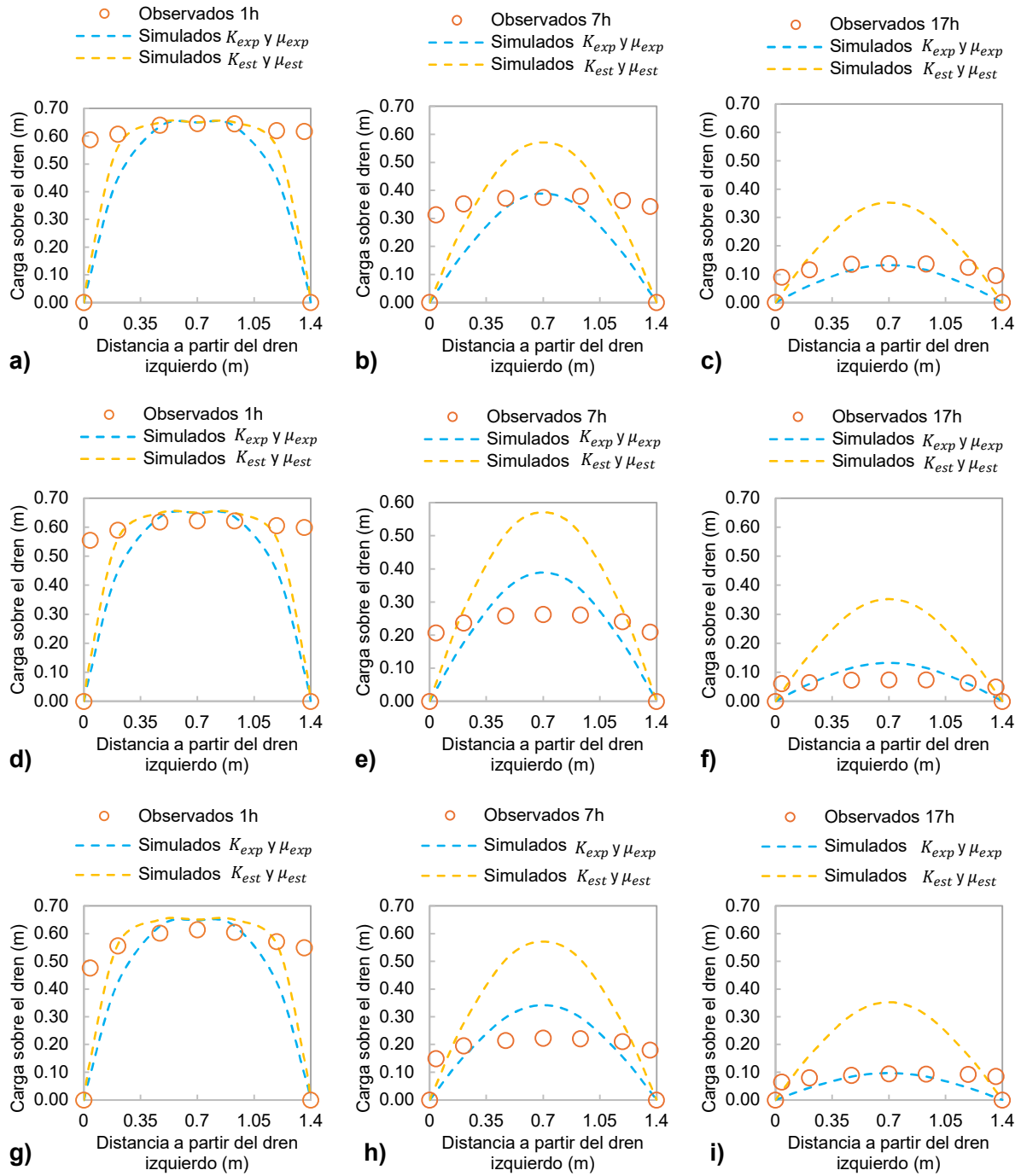


Figura 7. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) A1:2020-1h, b) A1:2020-7h, c) A1:2020-17h, d) A1:2023-1h, e) A1:2023-7h, f) A1:2023-17h, g) A1:2024-1h, h) A1:2024-7h, i) A1:2024-17h.

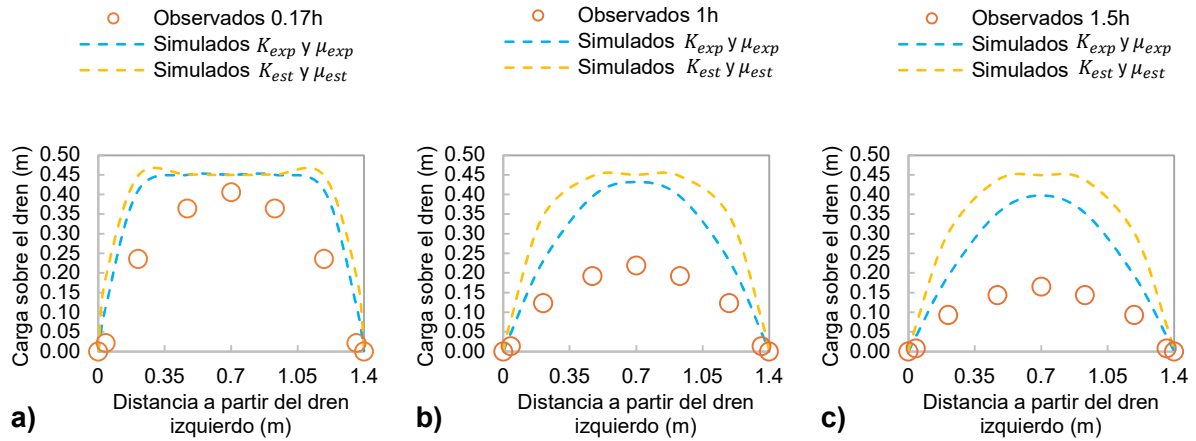


Figura 8. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) A3-0.17h, b) A3-1h y c) A3-1.5h.

En la configuración A2, el modelo sobrestimó la carga hidráulica al utilizar parámetros medidos como estimados (Figura 9a, 9b y 9c). En cambio, en la configuración A4 se obtuvo un mejor ajuste en ambos casos, aunque se presentó una ligera subestimación con parámetros experimentales en $t = 3$ h (Figura 9f). Además, el aumento del diámetro de los drenes mejoró la representación del flujo en las zonas cercanas a ellos.

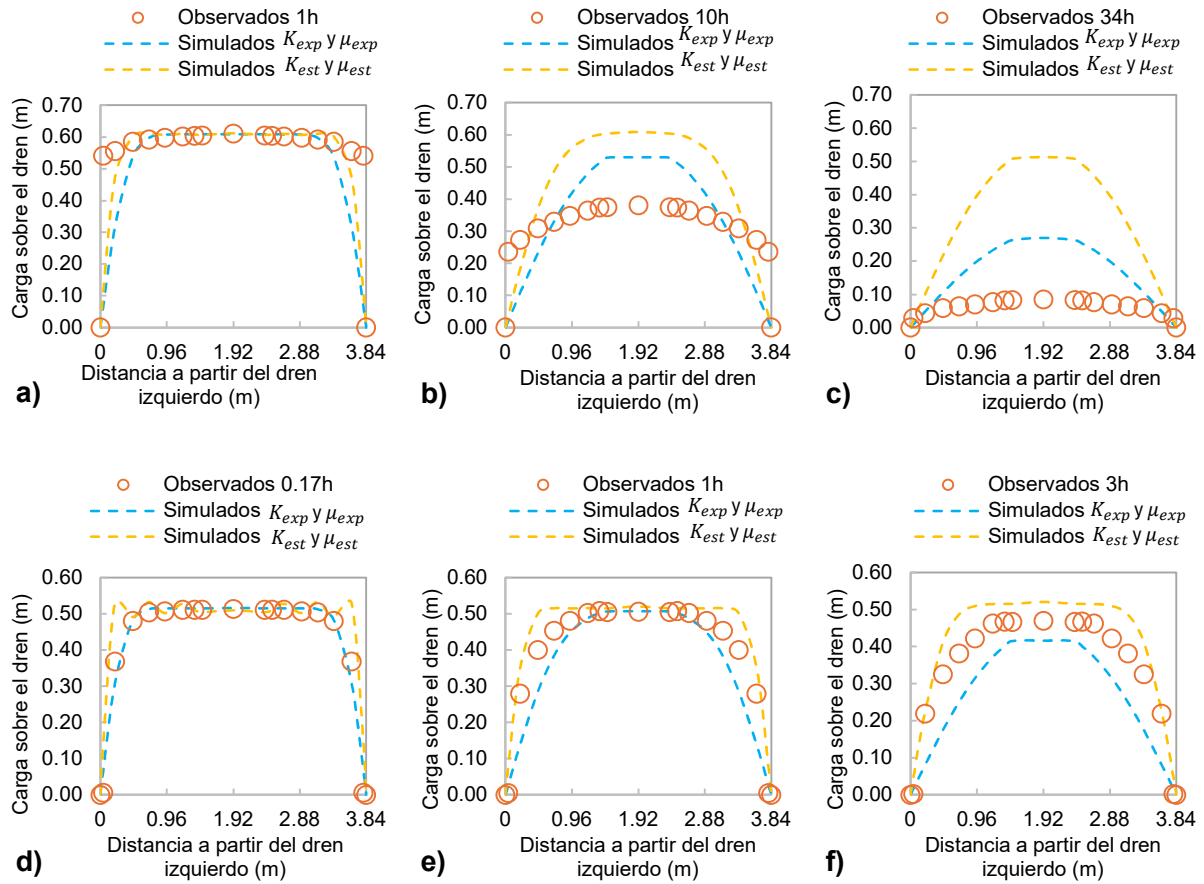


Figura 9. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) A2-1h, b) A2-10h, c) A2-34h, d) A4-0.17h, e) A4-1h, f) A4-3h.

En el suelo homogéneo (configuraciones B1 y B2), las simulaciones con parámetros experimentales tendieron a subestimar la carga hidráulica, mientras que con parámetros estimados se presentó una sobrestimación. En general, el ajuste obtenido con datos experimentales fue superior (Figura 10).

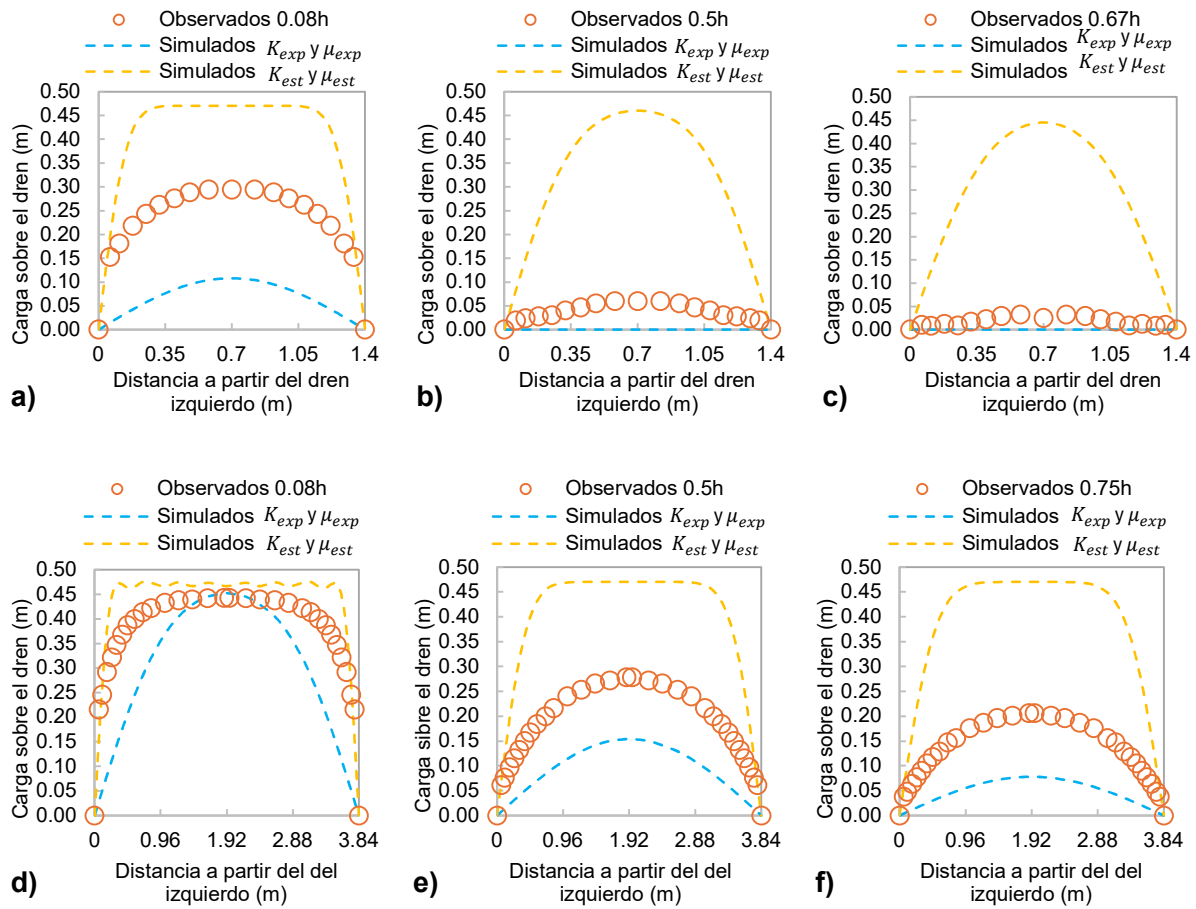


Figura 10. Evolución espacio-temporal de la carga hidráulica observada y simulada con el modelo de Glover-Dumm para las configuraciones: a) B1-0.08h, b) B1-0.5h, c) B1-0.67h, d) B2-0.08h, e) B2-0.5h, f) B2-0.75h.

En la Tabla 7 se presentan los resultados del desempeño estadístico del modelo de Glover-Dumm para todas las configuraciones evaluadas. En general, los valores de R^2 y NSE reflejan un desempeño aceptable del modelo con K_{exp} y μ_{exp} , especialmente en los perfiles heterogéneos A1 y A4, mientras que la estimación de la carga hidráulica con K_{est} y μ_{est} presenta un comportamiento más estable y menor variabilidad (C_v reducido), aunque con una ligera disminución en la eficiencia predictiva.

Tabla 7. Estadísticos del desempeño espacio-temporal de la carga hidráulica obtenida con el modelo de Glover-Dumm.

Configuración	Año	K_{exp} y μ_{exp}				K_{est} y μ_{est}			
		C_v	RMSE	R^2	NSE	C_v	RMSE	R^2	NSE
A1	2020	0.5241	0.191	0.761	0.317	0.2396	0.181	0.719	0.391
A1	2023	0.5146	0.150	0.771	0.495	0.2396	0.176	0.701	0.309
A1	2024	0.6022	0.134	0.806	0.533	0.2396	0.168	0.727	0.264
A2	2025	1.0667	0.150	0.760	0.483	0.3611	0.195	0.659	0.122
A3	2025	1.0973	0.123	0.953	-0.166	0.3715	0.170	0.902	-1.230
A4	2025	4.6562	0.068	0.959	0.881	0.5399	0.056	0.978	0.918
B1	2025	98.0968	0.091	0.850	-0.428	1.803	0.258	0.623	-10.53
B2	2025	104.4475	0.112	0.917	0.086	2.687	0.167	0.815	-1.05

Discusión

Ecuación de Hooghoudt clásico

En el suelo heterogéneo, la ecuación clásica de Hooghoudt reprodujo de forma aceptable el abatimiento del nivel freático al final de la prueba en la mitad de la separación de los drenes ($L/2$) en la configuración A1, con errores absolutos en la carga hidráulica menores a 0.14 m al emplear K_{exp} y de 0.11 m con K_{est} ; el menor error se registró con los datos estimados, alcanzando 0.033 m en A1 durante el año 2020. En las configuraciones A3 y A4, la ecuación sobrestimó notablemente la carga hidráulica: en A3 los errores fueron 0.360 m (K_{exp}) y 0.297 m (K_{est}), mientras que en A4 alcanzaron 0.947 m y 0.817 m, respectivamente. Estas diferencias reflejan las limitaciones del modelo al aplicarse en suelos con estratificación marcada, lo que afecta la precisión en la estimación de la carga hidráulica. En el suelo homogéneo la precisión fue elevada: los errores en la estimación de las cargas hidráulicas fueron 0.005 m (K_{exp}) y 0.020 m (K_{est}) en la configuración B1, y 0.050 m y 0.003 m en B2. Este comportamiento concuerda con las curvas temporales (Figura 4), donde se observa una subestimación al inicio de las pruebas y una sobreestimación al final de las pruebas más pronunciada en el perfil heterogéneo, lo que indica que el desempeño del modelo mejora conforme el perfil se aproxima a la homogeneidad hidráulica asumida.

La interpretación de los resultados se sustenta en los supuestos de DF, que consideran el flujo subterráneo esencialmente horizontal y los gradientes verticales despreciables, salvo en las proximidades del dren. La ecuación de Hooghoudt clásico incorpora además el concepto de espesor equivalente (d_e), que representa el efecto del flujo radial hacia el dren y permite extender la validez del modelo a configuraciones donde el flujo no es estrictamente horizontal (Van der Molen and Wesseling 1991; Ritzema 2006). En el presente estudio, las relaciones geométricas L/D muestran que el flujo mantiene una tendencia horizontal dominante en configuraciones con espaciamientos moderados, como A1 ($L/D = 5.6$) y A3 ($L/D = 4.0$), mientras que la participación del componente radial aumenta de forma notable en configuraciones con espaciamientos amplios, particularmente A2 ($L/D = 15.4$) y A4 ($L/D \approx 11.0$), lo que reduce la validez del d_e clásico. Este comportamiento se manifiesta en la sobreestimación de la carga hidráulica en $L/2$, especialmente en A3 y A4, donde la combinación de drenes más someros, diámetros mayores y una reducción progresiva de la macroporosidad experimental (μ_{exp}) del suelo heterogéneo favorece gradientes verticales y una mayor curvatura del potencial, de modo que el flujo real entre drenes se desvía parcialmente de las condiciones de flujo horizontal asumidas por los supuestos de DF. Diversos estudios coinciden en que la precisión del modelo clásico depende críticamente de la relación entre espaciamiento y profundidad efectiva ($h_0 + d_e$), de la homogeneidad hidráulica del perfil y de la correcta representación del d_e ; cuando el espaciamiento es grande respecto a la profundidad de los drenes (PD) o existe estratificación marcada, se incrementan los sesgos por flujo vertical y almacenamiento localizado (Gouze et al. 2015; Mishra and Singh 2007; Daisy Technical Manual 2023).

Las diferencias observadas entre los resultados obtenidos con K y μ medidos y los estimados permiten explicar los sesgos identificados, sin que ello represente un análisis de sensibilidad en sentido formal. En el suelo arenoso, K_{exp} fue 5.226 m día⁻¹ y K_{est} de 3.63 m día⁻¹, mientras que μ_{exp} varió entre 0.010 y 0.015 y μ_{est} fue 0.378. En el perfil heterogéneo μ_{exp} decreció progresivamente de 0.055 en A1 a 0.014 en A4, con conductividades de 0.406 y 0.093 m día⁻¹ para los estratos superior e inferior, respectivamente. En el suelo arenoso, la combinación de K_{est} menor y μ_{est} mayor tendió a sobreestimar la carga al final de la prueba (mayor almacenamiento), mientras que K_{exp} mayor y μ_{exp} menor aceleraron el abatimiento, produciendo subestimación al finalizar el periodo analizado con errores pequeños (B1–B2). En el perfil heterogéneo, la disminución de μ_{exp} intensificó el flujo casi horizontal en etapas finales de las pruebas, pero la estratificación continuó generando sesgos por incumplimiento parcial de los supuestos de DF y de la validez del d_e . Estas tendencias coinciden con la literatura reciente, que documenta que los parámetros hidráulicos derivados de FPT pueden diferir significativamente de los valores medidos en campo y requieren validación local (Gupta et al. 2021). Asimismo, se ha mostrado que Rosetta proporciona estimaciones razonables en un amplio rango de suelos, aunque su precisión depende de la similitud entre las propiedades del suelo

analizado y los conjuntos de datos empleados para su calibración (Zhang and Schaap 2017). Finalmente, la macroporosidad, especialmente en suelos con estructuras variables o con flujo preferencial, puede inducir errores adicionales cuando se representa mediante FPT genéricas (Jarvis et al. 2016; Schneider et al. 2022).

La alta resolución temporal y espacial del experimento, junto con el uso de sensores in situ (HOBO MX2001) y pozos distribuidos, incrementó la representatividad de K_{exp} y μ_{exp} , permitiendo documentar el reacomodo estructural del suelo (reducción de μ_{exp}) y su efecto sobre la dinámica del nivel freático. Sin embargo, la no estacionariedad de estas propiedades limita su extrapolación y demanda recalibraciones en campo. A escala de diseño, la ecuación clásica sigue siendo una herramienta eficiente y operativa en suelos próximos a la homogeneidad (como en el suelo arenoso) y para el estado estacionario, mientras que en el perfil estratificado o en configuraciones como A4, caracterizadas por espaciamientos amplios, resulta aconsejable recurrir a formulaciones que amplíen la representación del flujo radial o incorporen ajustes al d_e efectivo (Ritzema 2006; Van der Molen and Wesseling 1991; Gouze et al. 2015).

Ecuación de Hooghoudt modificado

La modificación de Mishra y Singh (2007) a la ecuación de Hooghoudt integra de forma explícita la transición entre el flujo radial y horizontal, redefiniendo la profundidad equivalente d_e a partir de un criterio de continuidad de gradiente y balance de masa. Esta formulación extiende el alcance del flujo radial hasta $r \approx (2/\pi)D$ y considera la influencia del cociente R/K , lo que la hace más sensible a condiciones de flujo no estacionarias (Mishra and Singh 2007; Mishra and Singh 2008). Mantiene los supuestos de Dupuit–Forchheimer en la zona horizontal, pero mejora la representación de la caída de carga cerca del dren cuando la geometría favorece la curvatura del potencial, en particular cuando el espesor transmisor efectivo es pequeño respecto a L . Este enfoque es coherente con los avances recientes sobre el cálculo de d_e y sus rangos de validez (van der Molen and Wesseling 1991; Ritzema 2006; Daisy Technical Manual 2023; Shokri and Bardsley 2014).

En este estudio, el modelo modificado mostró un desempeño estable y generalmente superior al clásico, reduciendo el sesgo positivo en la parte media de la separación de los drenes y representando con mayor precisión la curvatura del nivel freático cerca del dren. En el perfil de suelo heterogéneo A1 el error absoluto en la estimación de la carga hidráulica en $L/2$ al final de la prueba fue de 0.022 m, mientras que en el suelo arenoso B2 el ajuste fue prácticamente exacto (0.001 m). Estos resultados indican que la incorporación explícita del flujo radial mejoró la coherencia hidráulica, sobre todo en configuraciones con espesores transmisores reducidos respecto al espaciamiento entre drenes. La comparación entre los perfiles simulados con la ecuación clásica y la modificada mostró tendencias similares, aunque con menor dispersión y con una descripción más realista de la evolución del drenaje en los primeros instantes de vaciado, coincidiendo con observaciones de Mishra y Singh (2007) y Shokri y Bardsley (2014).

Los resultados confirman que la versión modificada mantiene la validez de los supuestos de Dupuit–Forchheimer en la zona horizontal y reproduce de forma más fiel la extensión radial observada experimentalmente. Persisten diferencias moderadas en $L/2$, que reflejan que la transición entre flujo radial y horizontal es más gradual en la realidad que en la formulación analítica. En configuraciones con relaciones L/D pequeñas, como A3 ($L = 1.4$ m, $D = 0.35$ m), el modelo clásico sobreestimó significativamente la carga, mientras que la versión modificada mejoró el ajuste al permitir un d_e mayor que D , en concordancia con resultados experimentales y teóricos recientes (Shokri and Bardsley 2014; Daisy Technical Manual 2023).

En relación con los parámetros hidráulicos, la ecuación modificada fue más robusta frente a la incertidumbre en K y μ . En el perfil de suelo heterogéneo, las simulaciones con K_{est} mostraron errores similares o ligeramente menores que con K_{exp} , lo que sugiere un efecto compensatorio entre la subestimación de K y la sobrestimación de μ en las funciones de pedotransferencia. En el suelo arenoso B2, esta compensación produjo un ajuste casi perfecto con datos estimados, mientras que con los valores medidos el modelo tendió a simular un descenso más rápido. Sin embargo, en configuraciones con

macroporosidad muy baja, como A4, ambas parametrizaciones subestimaron la carga sobre el dren, lo que confirma que la mejora en d_e no corrige completamente las variaciones estructurales del suelo. Estas tendencias concuerdan con estudios recientes que evidencian el papel de la macroporosidad y la conectividad en la descarga hacia drenes y la necesidad de calibración local de las FPT (Jarvis et al. 2016; Schneider et al. 2022; Way and Katuwal 2022).

La medición de la carga hidráulica sobre los drenes con una alta resolución espacial y temporal permitió validar la formulación de Mishra y Singh y constatar que el descenso del nivel freático fue más abrupto en la proximidad del dren, fenómeno que el modelo modificado reproduce al distinguir las zonas radial y horizontal. La calidad de los valores experimentales de la conductividad hidráulica y la macroporosidad, soportada por la confiabilidad y precisión de los dispositivos así como de una meticulosa estrategia de medición in situ, fortaleció la interpretación del modelo y mostró la influencia de la heterogeneidad del perfil, aunque las variaciones de K_{exp} y μ_{exp} de una prueba a otra limitaron la identificación de valores únicos para cada perfil de suelo analizado. La ecuación modificada se mostró eficiente y físicamente coherente en el entorno experimental, con una precisión ligeramente superior a la versión clásica y un comportamiento más estable frente a la variabilidad de los parámetros hidráulicos. No obstante, su carácter cuasi estacionario impide representar adecuadamente recargas súbitas o flujos preferenciales intensos, por lo que su uso resulta más apropiado en estudios de drenaje en equilibrio o para el diseño de sistemas donde los gradientes hidráulicos varían lentamente en el tiempo (Li et al. 2023; Zimmer et al. 2023).

Ecuación de Glover-Dumm

La ecuación de Glover–Dumm describe la disipación transitoria del nivel freático tras una recarga instantánea, resolviendo una forma linealizada de la ecuación de Boussinesq (Glover 1959; Dumm 1964). A diferencia de los modelos estacionarios de tipo Hooghoudt, incorpora la componente de almacenamiento a través de la macroporosidad eficaz o coeficiente de drenaje μ , permitiendo representar el proceso de abatimiento del nivel freático en el tiempo (Ritzema 1994). En el presente estudio, Glover–Dumm fue el modelo más representativo en la evolución espacio-temporal del nivel freático, especialmente en el perfil de suelo heterogéneo (A4 con $R^2 = 0.959$ y $NSE = 0.881$), evidenciando una excelente concordancia con las observaciones. En el suelo arenoso (B1–B2), el ajuste fue menos satisfactorio: las simulaciones con datos medidos reprodujeron la tendencia general, pero con ligeras subestimaciones al final de las pruebas cuando se alcanza la condición de flujo permanente, mientras que el uso de parámetros estimados (K_{est} y μ_{est}) produjo sobrestimaciones marcadas del nivel freático y descensos más lentos. Este comportamiento se asocia a los valores excesivos de $\mu_{est} = 0.378$, lo que implicó un almacenamiento mayor y una disipación más lenta del agua, reduciendo el coeficiente C_v . En las configuraciones experimentales del perfil de suelo heterogéneo, las diferencias entre parámetros experimentales y estimados fueron menores, lo que mantuvo una buena correspondencia entre los resultados simulados y medidos.

El cumplimiento de los supuestos teóricos determinó en gran medida el ajuste del modelo. En ambos tipos de perfiles de suelo, el nivel freático inicial fue completamente horizontal, cumpliendo la condición $\partial h / \partial x = 0$ establecida en la derivación de Glover–Dumm. No obstante, la validez de la hipótesis $h \approx D$ depende de que la relación h/D sea pequeña, de modo que la carga hidráulica sobre la capa impermeable sea mucho menor que el espesor transmisor efectivo (Ritzema 1994). En el suelo arenoso ($h_0 = 0.47$ m; $D = 0.37$ m), el cociente $h_0/D \approx 1.27$ indica que la linealización de Boussinesq fue razonablemente válida. En el suelo heterogéneo ($h_0 = 0.45$ – 0.65 m; $D = 0.25$ – 0.35 m), los valores de h_0/D alcanzaron entre 1.3 y 2.6, lo que reduce la validez de la aproximación horizontal. Esta condición se reflejó en los resultados: A4 ($h_0/D \approx 1.46$) obtuvo el mejor ajuste, mientras que A1 y A2 ($h_0/D > 2.4$) mostraron sobrestimaciones mayores en la parte media entre los drenes. La ecuación reprodujo de manera más precisa la dinámica transitoria cuando $h_0/D \leq 1.5$, confirmando que el cumplimiento aproximado del supuesto teórico se traduce en mejor capacidad predictiva (Yousfi and Mecherqui 2022).

La verificación de los supuestos se complementó con el análisis de los parámetros hidráulicos, ya que las discrepancias entre valores experimentales y estimados influyeron de forma decisiva en el desempeño del

modelo. La conductividad hidráulica (K) y la macroporosidad (μ) definen el coeficiente de drenaje $C_v = (Kd_e/\mu)$, que gobierna la rapidez del abatimiento del nivel freático. En el perfil heterogéneo, los valores experimentales ($K_{exp} = 0.4057\text{--}0.0928 \text{ m d}^{-1}$; $\mu_{exp} = 0.014\text{--}0.055$) produjeron C_v entre 0.5 y 4.6 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$, coherentes con las tasas de descenso observadas. Las estimaciones por FPT ($K_{est} = 0.2946\text{--}0.2802 \text{ m d}^{-1}$; $\mu_{est} = 0.14\text{--}0.15$) redujeron C_v a 0.2–0.6 $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$, lo que explica la sobrestimación simulada en A1 y A2, mientras que en A4 el modelo alcanzó su mejor desempeño ($R^2 = 0.959$; $\text{NSE} = 0.881$). En el suelo arenoso, la diferencia fue mucho más drástica: $K_{exp} = 5.226 \text{ m d}^{-1}$ y μ_{exp} de 0.010 y 0.015 frente a $K_{est} = 3.63 \text{ m d}^{-1}$ y $\mu_{est} = 0.378$, lo que disminuyó C_v en aproximadamente 30 veces, generando un drenado simulado mucho más lento y NSE negativos (–10.53 en B1; –1.05 en B2). Estudios recientes muestran que la macroporosidad controla significativamente el flujo hacia drenes y es un predictor fiable de K (Wang et al. 2024; Casali et al. 2024). En este contexto, la conductividad medida K_{exp} resultó más representativa de los flujos efectivos en todos los casos, especialmente en el perfil heterogéneo donde el reacomodo del suelo entre pruebas redujo μ_{exp} de 0.055 (A1) a 0.014 (A4) y modificó la curva de abatimiento.

Los resultados muestran que el grado de cumplimiento de los supuestos teóricos y la exactitud de los parámetros hidráulicos están estrechamente interrelacionados. Cuando $h_0/D \leq 1.5$ y se emplean K_{exp} y μ_{exp} , la ecuación de Glover–Dumm describió con precisión el abatimiento del nivel freático. Sin embargo, cuando $h_0/D > 2$ o las FPT sobrestimaron la μ experimental, el modelo perdió representatividad física, no por violar el supuesto geométrico, sino por distorsionar el balance entre la capacidad de almacenamiento y la capacidad de transmitir el agua. Estas evidencias respaldan el objetivo central de la investigación: la información experimental del suelo mejora significativamente la representatividad y precisión del modelo, mientras que las estimaciones como funciones de pedotransferencia pueden ser útiles solo si sus sesgos relativos en K y μ se reconocen y compensan. En términos de diseño de drenaje agrícola, estos hallazgos sugieren que los modelos transitorios pueden obtener resultados fidedignos cuando se alimentan con parámetros localmente medidos, pero requieren recalibración o análisis de sensibilidad en suelos donde D es pequeño, μ varía con el tiempo o el manto freático inicial no es idealmente plano.

Efectividad de los modelos

La comparación general de los tres modelos, Hooghoudt clásico, Hooghoudt modificado y Glover–Dumm, permitió identificar diferencias sustanciales en eficiencia, aplicabilidad y precisión hidráulica. Desde el punto de vista operativo, las ecuaciones de Hooghoudt resultaron las más eficientes, ya que ofrecen soluciones analíticas en régimen permanente que pueden evaluarse de forma inmediata, lo que las hace adecuadas para el dimensionamiento de drenes y estimaciones rápidas. La versión modificada, introduce un tratamiento más realista del flujo radial sin perder simplicidad algebraica, por lo que mantiene alta eficiencia computacional. En contraste, la ecuación de Glover–Dumm, aunque analítica, requiere iteraciones temporales y un mayor esfuerzo de parametrización, pero su carga computacional sigue siendo baja y puede resolverse fácilmente mediante rutinas numéricas simples (Sagas and van Schilfgaarde 1999; Ritzema 2006).

En cuanto al rango de aplicación, Hooghoudt clásico mostró buen desempeño en el perfil de suelo homogéneo o ligeramente anisótropos, donde sus supuestos de régimen estacionario se cumplen adecuadamente. Sin embargo, en el perfil de suelo estratificado, su validez estuvo condicionada por la representatividad de la conductividad hidráulica utilizada, que en estos casos debe funcionar como una conductividad hidráulica equivalente capaz de describir el flujo combinado de los estratos (Skaggs et al. 2012). La versión modificada amplió la aplicabilidad a configuraciones con drenes someros o espaciamientos cortos, donde el flujo radial tiene un papel más relevante y la versión clásica tiende a sobreestimar la carga hidráulica. En estas condiciones, Mishra y Singh demostraron que el modelo ajusta mejor la distribución del potencial hidráulico, observación corroborada experimentalmente en las configuraciones A3 y A4. Por su parte, la ecuación de Glover–Dumm fue la más adecuada para describir la evolución transitoria del nivel freático, especialmente durante las primeras horas de drenaje o tras una recarga instantánea, lo que la hace útil para estimar tiempos de abatimiento o evaluar drenaje controlado, siempre que las condiciones iniciales cumplan sus supuestos (Yousfi and Mechergui 2022).

En términos de precisión hidráulica, los resultados confirmaron un comportamiento diferencial entre los modelos. Glover-Dumm, con parámetros experimentales, alcanzó la mayor exactitud global ($NSE > 0.85$ y $R^2 > 0.95$ en el perfil heterogéneo), seguido del modelo de Hooghoudt modificado, que reprodujo adecuadamente la carga en el estado de cuasi permanencia y redujo de forma consistente la sobreestimación observada con la versión clásica. El modelo de Hooghoudt clásico mostró buen desempeño únicamente en el suelo homogéneo bajo condiciones estacionarias, pero presentó desviaciones notables en el perfil estratificado, con errores absolutos de hasta 0.9 m en la posición $L/2$. Esta jerarquía concuerda con los resultados de estudios previos que destacan la utilidad de Hooghoudt para diseño preliminar, del modelo modificado para geometrías particulares y de Glover-Dumm para simulaciones espacio-temporales más realistas (FAO 2002; Skaggs et al. 2012). Finalmente, se observó que la calidad y coherencia de los parámetros hidráulicos influyeron decisivamente en el desempeño de los modelos. En el caso de Glover-Dumm, los valores medidos experimentalmente de conductividad y macroporosidad mejoraron de forma notable el ajuste, validando la representatividad física del modelo. En contraste, los modelos de Hooghoudt, tanto clásico como modificado, mostraron un comportamiento inverso: al emplear parámetros experimentales presentaron errores ligeramente mayores que con propiedades estimadas mediante funciones de pedotransferencia. Esto se debió a que las PTF suavizaron la variabilidad vertical de K y μ , produciendo un efecto compensatorio que redujo el sesgo en el punto medio de la separación de los drenes ($L/2$). No obstante, los tres modelos coincidieron en que el uso de parámetros de origen experimental otorga mayor respaldo físico y coherencia hidráulica, aun cuando el ajuste numérico pueda variar según el tipo de suelo y la configuración del drenaje (Jarvis et al. 2016; Zhang and Schaap 2017; Schneider et al., 2022).

Es evidente que la obtención experimental de los parámetros hidráulicos del suelo requiere mayores costos y tiempos de medición. Sin embargo, esta desventaja puede compensarse ampliamente gracias al ahorro en la adquisición, instalación y operación de los sistemas de drenaje, así como al aumento en la productividad agrícola. Esto se logra al contribuir con representaciones más realistas del fenómeno físico y, en consecuencia, con diseños más adecuados que minimizan tanto los sobre-dimensionamientos como los sub-dimensionamientos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la efectividad de la modelación del nivel freático en drenaje subterráneo depende directamente de la calidad y representatividad de la información del suelo utilizada. El análisis comparativo de los tres modelos evaluados, Hooghoudt clásico, Hooghoudt modificado (Mishra and Singh, 2007) y Glover-Dumm, evidenció que los parámetros determinados experimentalmente (K_{exp} y μ_{exp}) proporcionan una mayor precisión y coherencia hidráulica que los estimados mediante funciones de pedotransferencia (K_{est} y μ_{est}). Entre los modelos analizados, Glover-Dumm mostró la mayor capacidad para reproducir la dinámica transitoria del nivel freático, alcanzando eficiencias superiores a 0.85 en el perfil de suelo heterogéneo y validando sus supuestos teóricos. La ecuación de Hooghoudt modificada ofreció un desempeño intermedio, mejorando la estimación de la carga hidráulica en configuraciones con drenes someros o espaciamientos reducidos, mientras que la versión clásica resultó confiable únicamente en el perfil de suelo homogéneo y bajo régimen estacionario. En las condiciones evaluadas, los resultados muestran que los parámetros hidráulicos medidos directamente representaron con mayor precisión la dinámica del drenaje subterráneo que los estimados mediante funciones de pedotransferencia.

Referencias

- Abdelbaki A, Youssef MA. 2010. Assessing the feasibility of DRAINMOD application using soil hydraulic properties estimated by pedotransfer functions. 10th International Drainage Symposium, ASABE.
- Abesh J, Hubbart JA. 2023. Evaluation of pedotransfer function accuracy in estimating saturated hydraulic conductivity using observed soil data. *Water*, 15(12), 2234.

- Askar MH, Ghane E, Youssef MA, Shedekar VS, King KW, Bhattarai R. 2024. Feasibility of predicting subsurface drainage discharge with DRAINMOD parameterized by uncalibrated SSURGO soil properties and ROSETTA3. *Journal of Natural Resources and Agricultural Ecosystems*, 2(1), 45–60.
- Boico VF, Therrien R, Højberg AL, Iversen BV, Kogant T, Varvaris I. 2021. Using depth-specific electrical conductivity estimates to improve hydrological simulations in a heterogeneous tile-drained field. *Journal of Hydrology*, 598, 126447.
- Daisy Technical Manual. 2023. Appendix 4.2: Options for calculation of equivalent depth in Hooghoudt's equation. University of Copenhagen.
- Dumm LD. 1964. Transient-flow concept in subsurface drainage: its validity and use. *Transactions of the ASAE*, 72, 142–144.
- Glover RE. 1959. The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 644, 457–459.
- Gouze P, et al. 2015. A correction for Dupuit–Forchheimer interface flow models of seawater intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 522, 1–13.
- Guedessou C, Caron J, Gallichand J, Béliveau M, Dessureault-Rompré J, Libbrecht C. 2021. Modeling subsurface drainage in compacted cultivated histosols. *Frontiers in Water*, 3, 743612.
- Gupta S, Lu Y, Mishra A, Rawat KS. 2021. SoilKsatDB: a global database of soil saturated hydraulic conductivity. *Earth System Science Data*, 138, 3253–3270.
- Gupta S, Hengl T, Lehmann P, Bonetti S, Or D. 2021. SoilKsatDB: Global database of soil saturated hydraulic conductivity measurements for geoscience applications. *Earth System Science Data*, 13, 1593–1612.
- Hu W, Shao MA, Wang QJ. 2021. Effects of soil structure on hydraulic conductivity and macropore flow under different land uses. *Soil and Tillage Research*, 205, 104810.
- IMTA Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2019. Evaluación de drenaje agrícola en suelos con problemas de salinidad y anegamiento en Chiapas. Informe técnico. Jiutepec, México.
- Jarvis NJ. 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 583, 523–546.
- Jarvis N, Koestel J, Larsbo M. 2016. Understanding preferential flow in the vadose zone: Recent advances and future prospects. *Vadose Zone Journal*, 1512.
- Karnezis T, Pisinaras V. 2022. Fuzzy Unsteady-State Drainage Solution for Land Reclamation. *Water*, 102, 34. Discusión de Glover–Dumm y condiciones iniciales.
- Koestel J, Jarvis N. 2018. Scanning the heterogeneity of macropore flow in soils: A review of recent advances in imaging and modeling. *Advances in Water Resources*, 116, 36–47.
- Larsbo M, Koestel J, Jarvis NJ. 2019. Relations between macropore network characteristics and preferential solute transport. *Geoderma*, 343, 116–123.
- Malota M, Taguta C, Dirwai T, Senzanje A, Mabhaudhi T. 2022. Accuracy of WaSim and DRAINMOD models for subsurface drainage design and analysis in a data-scarce environment. *Proceedings of the 11th International Drainage Symposium*, 30 Aug–2 Sep 2022, Des Moines, Iowa, USA.
- Marthews TR, Dunn RJH, Galvis CM, et al. 2024. HydroFPT: A roadmap for developing and evaluating pedotransfer functions for hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 285, 1901–1924.

- Mishra GC, Singh R. 2007. A modified equation of Hooghoudt for estimating drain spacing in layered soils. *Agricultural Water Management*, 923, 255–262.
- Mishra GC, Singh VP. 2007. A new drain spacing formula. *Hydrological Sciences Journal*, 522, 338–349.
- Nabi-Sichani N, Sepaskhah AR. 2012. Evaluation of different methods for the determination of saturated hydraulic conductivity for simulation of water table depth and drainage discharge using the DRAINMOD model. *Irrigation and Drainage*, 615, 566–577.
- Qi Z, Helmers MJ, Singh R. 2006. Evaluating a drainage model using soil hydraulic parameters derived by various methods. *Transactions of the ASABE*, 493, 875–883.
- Ritzema HP Ed. 2006. *Drainage principles and applications* 3.^a ed.. ILRI/Wageningen.
- Schneider R, Fienen MN, Bjerre E, Koch J, Højberg AL. 2022. The role of macropore flow for tile drain discharge: Field experiment and modeling. *Journal of Hydrology*, 604, 127226.
- Skaggs RW. 1982. Field evaluation of a water management simulation model DRAINMOD. *Transactions of the ASAE*, 253, 666–674.
- Skaggs RW, Youssef MA, Chescheir GM. 2012. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 554, 1509–1522.
- Troch PA, et al. 2015. Is the Dupuit assumption suitable for predicting the groundwater seepage area in hillslopes? *Water Resources Research*, 5110, 1–20.
- Varvaris I, Børgesen CD, Kjaergaard C, Iversen BV. 2018. Two-dimensional approaches for simulating water flow dynamics in a heterogeneous tile-drained agricultural field. *Soil Science Society of America Journal*, 824, 751–768.
- Williams MR, McAfee SJ. 2021. Water storage, mixing, and fluxes in tile-drained agricultural fields inferred from stable water isotopes. *Journal of Hydrology*, 599, 126347.
- Yáñez-Díaz M, López-Reynoso C, Martínez-Ramos R. 2019. Evaluación hidrofísica de un Vertisol bajo distintos usos del suelo en el norte de México. *Terra Latinoamericana*, 373, 217–230.
- Zhang Y, Schaap MG. 2017. ROSETTA3: An improved model for predicting soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 547, 39–53.
- Zhang Y, Schaap MG. 2017. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics Rosetta3. *Journal of Hydrology*, 547, 39–53.
- Zimmer D, Tournebise J, Bouarfa S, Kao C, Lesaffre B. 2023. Land drainage functioning and hydrological impacts in rural catchments: Model development and field experiments. *Comptes Rendus Geoscience*, 3553, 57–72.

5 CAPÍTULOS PUBLICADOS EN LIBROS

Título de libro: Información, Estabilidad y Dinámica en los Modelos Económicos.

ISBN: 978-607-99921-2-5.

Evaluación de ecuación de régimen permanente para el diseño de drenes subterráneos parcelarios

Ángel Hernández Facundo¹ y Jorge Víctor Prado Hernández²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México., facirrigacion@hotmail.com.

²Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México., Correo autor de correspondencia: vpradohdez@gmail.com.

Mesa 1: Matemáticas y física.

Resumen

Se construyó un modelo físico en laboratorio para simular un sistema de drenaje agrícola subterráneo y se midió la variación del Nivel Freático (NF) en el perfil del suelo representado con la finalidad de evaluar el modelo matemático para flujo permanente de Mishra y Sing. Se utilizaron suelos de los estratos 4 y 5 del campo experimental "La Ceroná" de la Universidad Autónoma Chapingo para formar un perfil de 90 cm de espesor, con densidades aparente (D_a) de 1.22 y 1.46 g cm⁻³ y conductividad hidráulica (K) de 0.4057 y 0.0928 m día⁻¹, respectivamente. El experimento consistió en saturar por gravedad el perfil de suelo a través de dos tubos ranurados colocados verticalmente dentro del suelo y alimentados por un contenedor elevado de 200 l; el NF se abatió con dos drenes subterráneos paralelos de 1 cm de diámetro, colocados a 0.65 m de profundidad con una separación (L) de 1.4 m y pendiente de 1 %. La variación del NF se midió manualmente durante 17 horas con nueve piezómetros. Se observaron diferencias en la forma de los perfiles del NF observado y simulado, pero se encontró una buena aproximación del modelo en el eje de simetría del flujo ($L/2$) después de tiempos prolongados de drenado. En consecuencia, el modelo matemático analizado, puede ser una buena alternativa para el diseño de drenes subterráneos en suelos agrícolas sujetos a condiciones de régimen permanente.

Palabras clave: Drenaje agrícola, flujo permanente, nivel freático, evaluación.

Abstract

A physical model was constructed in the laboratory to simulate a subsurface agricultural drainage system and the variation of the water table (NF) in the soil profile represented in order to evaluate the mathematical model for permanent flow of Mishra and Sing. Soils from strata 4 and 5 of the experimental field "La Ceroná" of the Universidad Autónoma Chapingo were used to form a 90 cm thick profile, with bulk densities (D_a) of 1.22 and 1.46 g cm⁻³ and hydraulic conductivity (K) of 0.4057 and 0.0928 m día⁻¹, respectively. The experiment consisted of gravity saturating the soil profile through two slotted tubes placed vertically into the soil and fed by an elevated 200 l container; the NF was abated with two parallel subway drains of 1 cm diameter, placed at 0.65 m depth with a separation (L) of 1.4 m and slope of 1 %. NF variation was measured manually for 17 hours with nine piezometers. Differences in the shape of the observed and simulated NF profiles were observed, but a good model approximation was found on the flow symmetry axis ($L/2$) after prolonged drainage times. Consequently, the mathematical model

analyzed can be a good alternative for the design of subsurface drains in agricultural soils subject to permanent regime conditions.

Keywords: Agricultural drainage, permanent flow, ground water table, evaluation.

Introducción

Las áreas cultivables disminuyen debido a la salinización del suelo, erosión y urbanización. Es necesario aumentar sustancialmente la producción de cultivos en las áreas húmedas, además se requiere de la agricultura de riego para proveer grandes proporciones de alimento en las regiones áridas y húmedas (Ayars y Evans, 2015). El drenaje agrícola artificial elimina el exceso de agua que afecta el desarrollo y producción de cultivos del perfil del suelo, además, facilita la remoción de sales permitiendo la recuperación de éstas zonas agrícolas (Oyarce et al., 2017).

La superficie potencial de riego en función de la aptitud de la tierra en México es de 13.5 millones de ha, esta superficie se reduce a 9.8 millones de ha si se toma en cuenta la disponibilidad de agua. La mayor parte de las tierras subutilizadas se localizan en el trópico húmedo, en donde se construyeron 18 Distritos de Temporal Tecnificado para el aprovechamiento de 7.5 millones de ha agrícolas con infraestructura hidráulica destinada a la evacuación del agua en exceso (FAO, 2014).

La Comisión Internacional de Riego y Drenaje en su base de datos de zona drenada del mundo, registra para México 27.5 millones de hectáreas de tierras arables y cultivos permanentes de las cuales solo el 18.9% cuenta con drenes (ICID, 2018). Aunque, el diseño y la gestión de los sistemas de riego han evolucionado enormemente en las últimas décadas, la metodología de diseño y los criterios de gestión del drenaje subterráneo no han cambiado en los últimos 50 años. Por lo tanto, todos los aspectos del drenaje agrícola requieren una seria reconsideración y reevaluación para poder satisfacer las nuevas necesidades de drenaje (Ayars y Evans, 2015).

De los 6.81 millones de ha bajo riego en México, el 74.9% de esta superficie aún se aplica riego por gravedad (Inegi, 2019). Esta superficie se encuentra dividida en 86 Distritos de Riego y más de 40 mil Unidades de Riego, donde el manejo del agua es de baja eficiencia global (Conagua, 2018).

Namuche Vargas et al. (2020) estiman que del 10% de área bajo riego y 16% de los 7.5 millones en zonas del trópico húmedo en el país presentan problemas de salinidad y drenaje en algún grado. Además, este problema se incrementa en 10 mil ha año⁻¹ en áreas de riego y disminuye la producción en un 25%.

En muchos casos, los problemas asociados a niveles freáticos someros se han controlado mediante la instalación de sistemas de drenaje subterráneo (Hornbuckle et al., 2007; Ayars et al., 2006) y son medidas importantes para mantener o mejorar la productividad de tierras agrícolas (Rimidis y Dierickx, 2004). Además, Ayars et al., (2006) detallan que los beneficios derivados del drenaje agrícola son en la mejoría de: producción de cultivos, aireación del suelo, capacidad de tránsito de equipo agrícola, gestión de salinidad del suelo, protección a la infraestructura, condiciones de salud de los seres humanos al eliminar aguas estancadas que transmiten enfermedades relacionadas con el agua, e inclusive contribuye a mantener zonas de alimentación y humedales para la vida silvestre y las aves migratorias, así como para la recreación y la pesca.

De acuerdo a Ritzema, citado por Darzi-Naftchally et al., (2014) los dos tipos básicos de ecuaciones empleadas para determinar el espaciamiento de drenaje parcelario son de estado permanente y de estado transitorio. Cuando se utilizan las ecuaciones de estado permanente, la descarga de drenaje de diseño se considera igual que la recarga neta promedio a través del tiempo y, en consecuencia, el nivel freático permanece constante en el tiempo. En áreas irrigadas o con precipitaciones muy variables, estas suposiciones no se cumplen y las ecuaciones del estado transitorio son a veces más apropiadas. Sin

embargo, muchos de los diseños utilizados se realizan con ecuaciones de régimen permanente, debido a que los datos básicos requeridos para el diseño de los drenajes subterráneos pueden ser extremadamente laboriosos y costosos de recolectar.

Tanto la obtención de parámetros utilizados en el diseño, así como los procedimientos de cálculo provocan diseños deficientes. Una solución común a un diseño deficiente instalado en campo es reducir el espacio lateral mediante la instalación de un lateral adicional entre dos existentes, lo cual es una situación menos que ideal debido al costo y la pérdida de productividad debido a la saturación de agua y la salinización antes de proporcionar un drenaje adecuado (Namuche Vargas et al. 2020).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el modelo matemático de Mishra y Singh (2007), a través de un modelo físico que representa las condiciones reales del campo Experimental “La Cerona”. El interés de este suelo se basa en su estratigrafía y además el problema real de anegamiento que presenta, pues diferentes autores como: Zavala et al. (2012), Mehdinejadani et al. (2013), Darzi-Naftchally et al. (2014) y Oyarce et al. (2017) han utilizado suelos homogéneos con un solo estrato en la evaluación de modelos matemáticos.

Materiales y métodos

El experimento se construyó en las instalaciones del campo experimental Tlapeaxco del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). El suelo utilizado fue del campo experimental “La Cerona”, cuya superficie es de 9.31 ha (Figura 1).

Figura 1. Perfil pedológico excavado en el campo experimental “La Cerona”



Fuente: Propia.

Hernández (2020) realizó un diagnóstico de drenaje en este predio en un periodo de diez meses en 2019 con la finalidad de conocer la magnitud y origen del problema de anegamiento parcial que se presentaba, así mismo determinó la caracterización hidrodinámica del suelo. Los resultados mostraron que el Nivel Freático fluctuaba a profundidades menores a 1 m en un 30% de la superficie en los meses de riego, y a profundidades mayores de 1 m en un 50% de la superficie en todo el periodo analizado. En los dos pozos pedológicos realizados se identificaron cinco estratos de suelo y el nivel freático se manifestaba en el

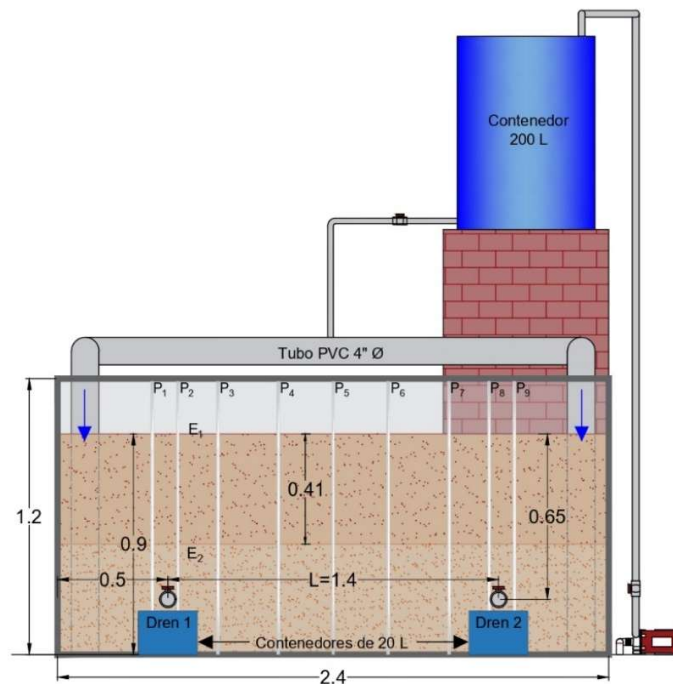
estrato cuatro y cinco a profundidades mayores de 80 cm, dado lo anterior, el suelo se extrajo a esa profundidad.

Se removió el suelo y se colocó sobre un plástico a la intemperie para retirar la humedad, el tiempo aproximado de secado fue de 48 horas o hasta que se identificó el suelo completamente seco. Este suelo se tamizó en una malla de 1.2 mm de abertura y se pesó con una báscula tipo romana con precisión de 0.5 kg, para posteriormente ser almacenada en bolsas de polipropileno en cantidades de 25 a 35 kg cada uno. Del estrato cuatro se extrajeron 1,760 kg y del estrato cinco 2,105 kg que se trasladaron hasta el área donde se construyó e instaló el modelo físico.

Modelo físico experimental

El modelo físico se construyó con una estructura desarmable de aluminio de 2.44 m de largo, 1.24 m de ancho y 1.24 m de altura, con paredes de acrílico transparente sujetas a barras verticales y horizontales con tornillos y arandelas a cada 0.3 m. En las caras de mayor longitud se colocaron dos soportes verticales a cada 81 cm y en las caras pequeñas únicamente se colocaron soportes en la parte media. Entre el acrílico y la estructura de aluminio se introdujo una solera de polímero y silicón adhesivo en la parte interna para impedir filtraciones de agua (Figura 2).

Figura 2. Modelo experimental construido



Fuente: Propia.

Antes de llenar el contenedor de suelo se realizó la instalación de los pozos de observación y los piezómetros dentro de la estructura. Los Pozos de Observación (PO) consistieron en tubos de PVC de 3 cm de diámetro interior, con 8 líneas de orificios de 5 mm a cada 2 cm, distribuidos de manera uniforme en toda la pared del tubo; los tubos empleados se cubrieron con una malla de polietileno de 1.35 mm de abertura y sobre ella se colocó otra malla de 0.8x0.6 mm de abertura para impedir el ingreso de partículas finas. Los PO se instalaron en el centro del contenedor paralelos a la cara más grande. El primer PO se instaló a 45 cm de la pared lateral del acrílico y posteriormente a separaciones 11, 17, 25.6, 23.3, 23.3, 25.6, 17 y 11 cm entre ellos, de tal manera que se pudiera caracterizar el perfil del NF. Los piezómetros

(P) se instalaron de tubos transparentes de 12 mm de diámetro conectados desde la parte inferior de los PO hasta la parte externa del contenedor con la finalidad de observar y medir el NF.

La compactación del suelo dentro del contenedor se realizó de manera uniforme utilizando un apisonador de madera con peso de 3 kg. Para el estrato cuatro se agregaban 70 kg de suelo que se distribuía en toda la superficie del contenedor y se compactaba hasta alcanzar una altura de 1.9 cm calculado a partir del área de 2.44 x 1.24 m de la estructura y la densidad de 1.22 kg cm⁻³ del suelo. Para el estrato cinco la misma masa de suelo requirió una altura de 1.6 cm para la densidad de 1.46 kg cm⁻³ la cual fue mayor.

La altura del estrato cinco fue de 49 cm y la del estrato cuatro de 41 cm, formando un perfil de suelo con dos estratos de 90 cm de profundidad. Los drenes se colocaron a 25 cm de la base y a 50 cm de la pared lateral, quedando ubicados en el estrato inferior, y la separación entre ellos fue de 1.40 m con pendiente de 1%. Su ubicación de acuerdo a los pozos de observación para el primer dren es a 7 cm del pozo uno y 4 cm del pozo dos y para el segundo dren es 4 cm del pozo ocho y 7 cm del pozo 9.

Las características físicas del suelo que se utilizó en el modelo se muestran en la Tabla 1. Las humedades de capacidad de campo (θ_{cc}) y saturación (θ_s) se obtuvieron en laboratorio, las muestras se adquirieron del pozo pedológico.

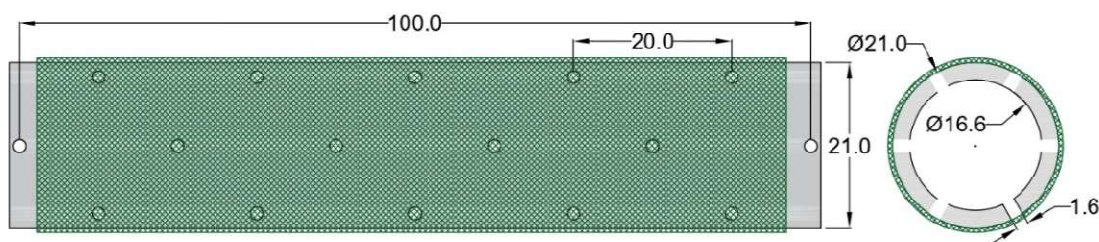
Tabla 1. Características del suelo utilizado en el modelo

Estrato	Espesor (m)	Textura	θ_{cc} (%)	θ_s (%)	Da (g cm ⁻³)
4	0.49	Franca	37.25	57.51	1.22
5	0.41	Franca	31.87	46.76	1.46

Fuente: Datos de laboratorio.

Los tubos de drenaje se perforaron de manera manual siguiendo las recomendaciones de la FAO (2009) que proponen orificios de 0.6 a 2 mm, distribuidos uniformemente en la pared de la tubería, por lo menos en cuatro filas con un mínimo en cada fila de dos perforaciones cada 100 mm, dado lo anterior se hicieron perforaciones de 1.6 mm a cada 2 cm en seis hileras de la pared del tubo (Figura 3) y se cubrió con una primera malla de polietileno de 1.35 mm de abertura y una segunda malla de 0.8x0.6 mm de abertura.

Figura 3. Características del drenaje subterráneo



Fuente: Propia.

Para la saturación del perfil del suelo se instalaron dos tubos en la parte posterior del modelo cubriendo el perfil del suelo, de manera vertical de 10 cm de diámetro con orificios de 5 mm a cada 4 cm en 10 hileras, los cuales fueron alimentados por un contenedor elevado de 200 litros. El cálculo del volumen a aplicar para saturar el suelo se hizo con base en el contenido de humedad inicial y de saturación del suelo; el primero de ellos fue obtenido con un TDR 300 ® y el segundo fue obtenido en laboratorio.

Para obtener la conductividad hidráulica (K) de los dos estratos se usó el método del pozo barrenado en el modelo físico experimental. El descenso del agua se midió con una sonda HOBO MX2001 ®, con una

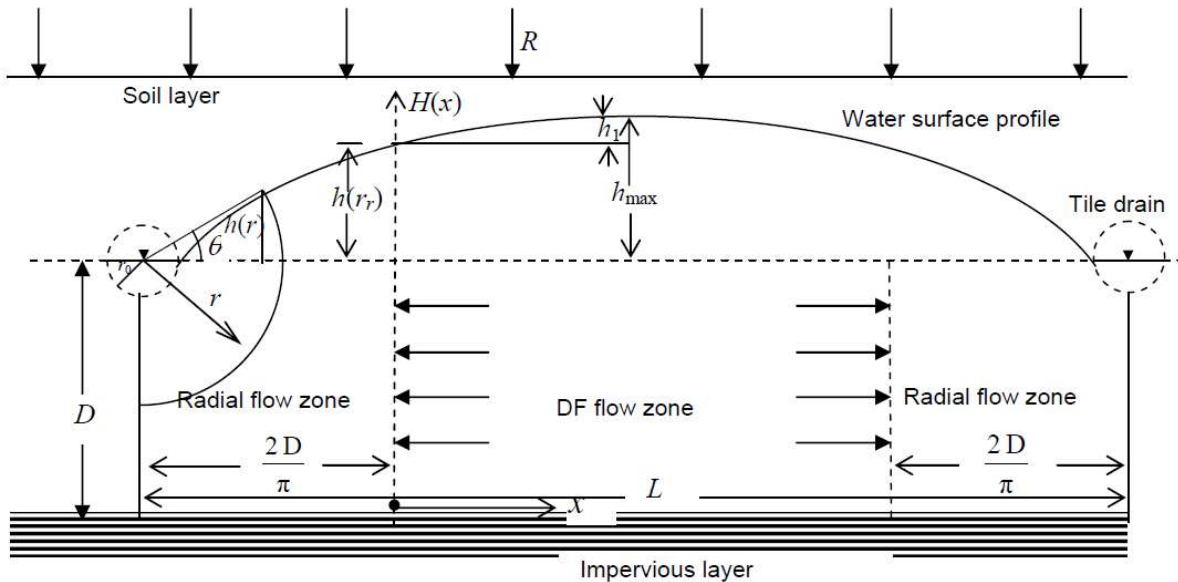
resolución de décimas de milímetros y precisión de 3 mm y rango de respuesta de 1 s a temperatura estable. Se elaboró un pozo de 10.4 cm de diámetro para realizar la prueba de conductividad, en el estrato superior fue de una profundidad de 25 cm y en el estrato inferior se excavo hasta una profundidad de 70 cm.

Para conocer la evolución del NF en proceso del drenado, una vez que se saturó el suelo y se abrieron los drenes, se registraron las lecturas en los piezómetros a 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14 y 17 horas. Complementariamente, se obtuvo la evolución del volumen desalojado por cada uno de los drenes para calcular la recarga aplicada al suelo.

Modelo matemático

Se evaluó el modelo matemático de Mishra y Singh (2007), el cual considera el flujo horizontal y radial. La extensión de la zona de flujo radial la determinaron aplicando un criterio de balance de masa y diferenciabilidad del perfil de la superficie del agua en la interfaz de las zonas de flujo radial y Dupuit-Forchheimer (Figura 4).

Figura 4. Flujo constante a los drenes que muestran las zonas de flujo radial y de Dupuit Forchheimer



Fuente: Mishra y Singh (2007).

La carga de flujo radial sobre los drenes $h(r_r)$ (m), se obtiene con la ecuación (1):

$$\frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right) + \frac{R}{K} \right] - \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{\pi L}{4 \left(r_0 - \frac{L}{2} \right)} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi L}{4 \left(r_0 - \frac{L}{2} \right)} \right) + \frac{R}{K} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\pi}{8\sqrt{\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right)}} \left[\ln \left\{ \frac{\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right) + \frac{R}{K}}{\left(\left(\frac{h(r_r) + \frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi} - \frac{L}{2}} \right) + \frac{\pi}{4} + \sqrt{\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right)} \right)^2} \right\} - \ln \left\{ \frac{\left(\frac{\pi L}{4 \left(r_0 - \frac{L}{2} \right)} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi L}{4 \left(r_0 - \frac{L}{2} \right)} \right) + \frac{R}{K}}{\left(\left(\frac{\pi L}{4 \left(r_0 - \frac{L}{2} \right)} \right) + \frac{\pi}{4} + \sqrt{\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K}\right)} \right)^2} \right\} \right] \\
& - \ln \left(\frac{\frac{L}{2} - r_0}{\frac{L}{2} - \frac{2D}{\pi}} \right) = 0
\end{aligned}
\tag{1}$$

la cual es válida para

$$\left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{R}{K} \right) > 0$$

donde L es la separación entre drenes (m), D es el espesor de suelo entre el centro del dren y la capa impermeable (m), R es la recarga (m d⁻¹); K es la conductividad hidráulica a saturación (m d⁻¹); y r₀ es el diámetro interno del dren (m).

La carga en la zona de flujo horizontal (H(x)) se obtiene como:

$$H^2(x) = -\frac{R}{K}x^2 + \frac{R}{K}\left(L - \frac{4D}{\pi}\right)x + (h(r_r) + D)^2 \tag{2}$$

Entonces la carga máxima sobre los drenes, en la mitad de la separación de los drenes, se calcula de la siguiente manera:

$$h_{\max} = h_1 + h(r_r) = \sqrt{(D + h(r_r))^2 + \frac{R}{4K}\left(L - \frac{4D}{\pi}\right)^2} - D \tag{3}$$

donde:

$$h_1 = -(D + h(r_r)) + \sqrt{(D + h(r_r))^2 + \frac{R}{4K}\left(L - \frac{4D}{\pi}\right)^2} \tag{4}$$

Evaluación del modelo matemático

El modelo matemático se evaluó con el error máximo (ME), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), coeficiente residual de masa (CRM), coeficiente de determinación (CD) y eficiencia del modelo (EF):

$$ME = \text{Max}|h_i - h'_i|_{i=1}^N \tag{5}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h'_i - h_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\bar{h}} \tag{6}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N h'_i - \sum_{i=1}^N h_i}{\sum_{i=1}^N h'_i} \quad (7)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}{\sum_{i=1}^N (h'_i - \bar{h})^2} \quad (8)$$

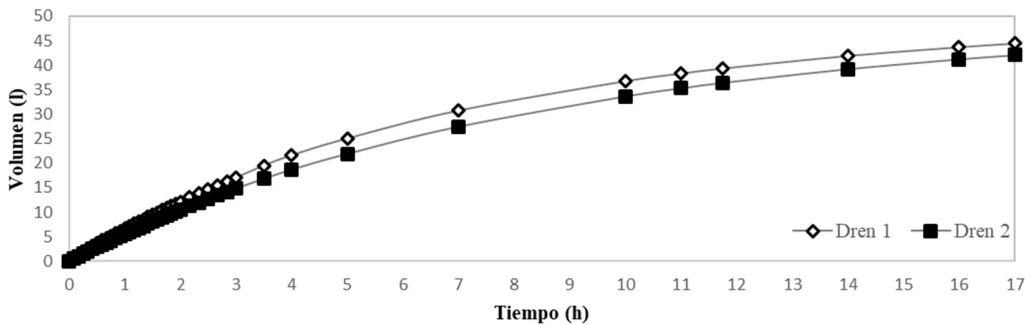
$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2 - \sum_{i=1}^N (h'_i - h_i)^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (9)$$

donde h_i es la i -ésima carga simulada (m), h'_i es la i -ésima carga observada (m), $\bar{h}$ es la media de las cargas observadas (m), y N es el número de datos.

Resultados

El volumen total drenado a las 17 horas fue de 44.42 litros para el dren 1 y 42.3 litros para el dren 2. Hasta las 3 horas el volumen se presentó de manera exponencial posteriormente disminuyó considerablemente, comportándose de forma asintótica después de las 7 horas e indicando que a las 17 horas terminó el drenado. En el dren 1 siempre se obtuvo mayor gasto, esta variación también se reflejó en la carga sobre los drenes. Con el volumen drenado a las 17 h se obtuvo que la recarga (R) fue 0.042 m d^{-1} .

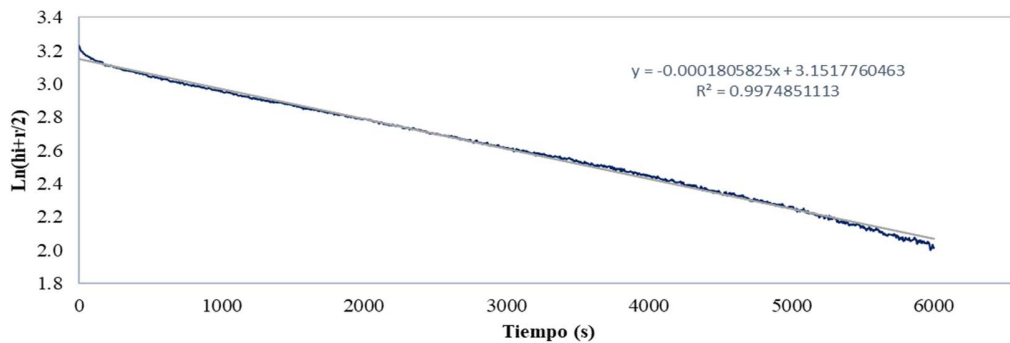
Figura 5. Volumen de agua drenado del dren 1 y 2 medido durante 17 horas



Fuente: Propia.

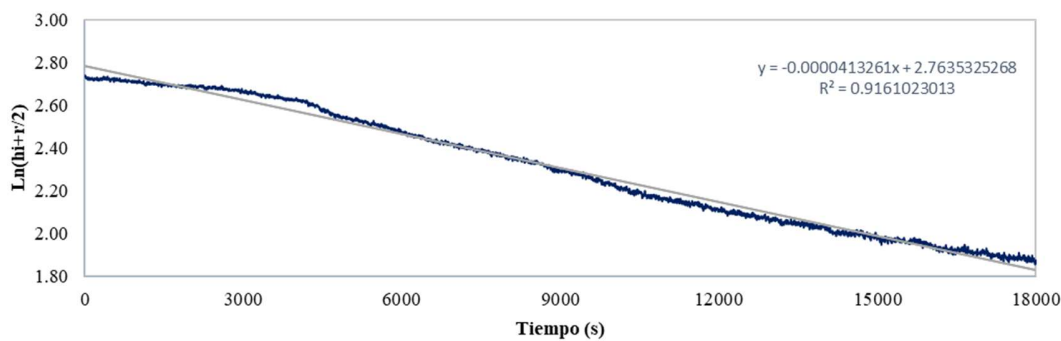
Los descensos del agua dentro de los pozos para la determinación de la conductividad hidráulica a saturación se muestran en las Figuras 6 y 7. Las conductividades resultaron de 0.4057 m d^{-1} para el estrato superior y de 0.0928 m d^{-1} para el estrato inferior.

Figura 6. Descenso del agua en el estrato cuatro



Fuente: Propia.

Figura 7. Descenso el agua en el estrato cinco

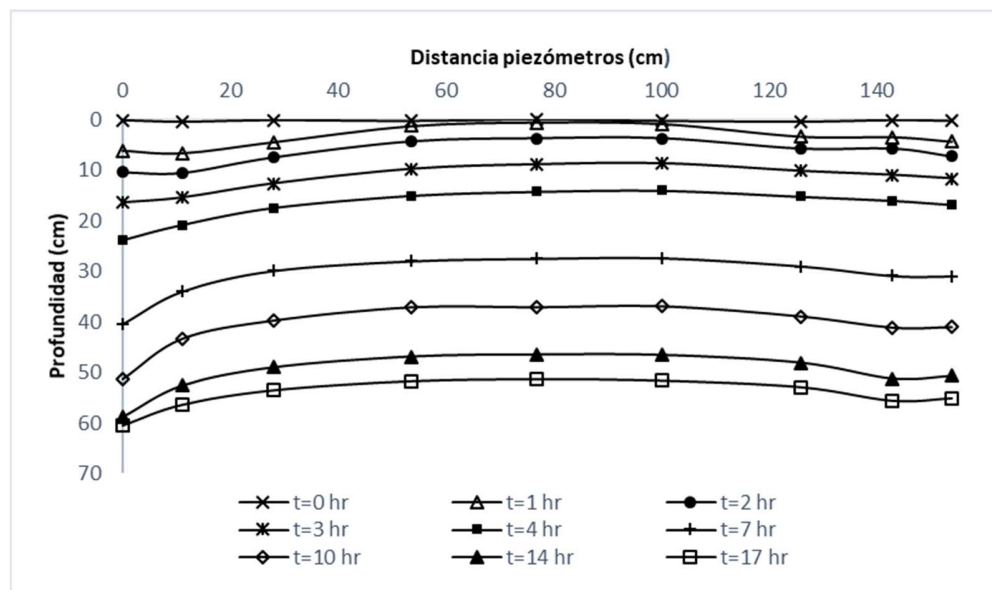


Fuente: Propia.

Debido a la densidad aparente el estrato cinco se compactó un 20% más que el estrato cuatro, por tal motivo resultó una conductividad hidráulica de 0.0928 m d^{-1} teniendo una diferencia de 0.3129 respecto a la conductividad hidráulica del estrato cuatro.

La evolución temporal y espacial observada del NF se muestra en la Figura 8. El perfil freático desde el inicio mostro mayor profundidad sobre los drenes y menor profundidad en el centro. En las primeras 3 horas el nivel freático descendió 9 cm en el eje de simetría y en la hora 4 bajo hasta 14 cm, a partir de este tiempo el descenso se mostró pausado debido a que llego a 27.5 cm en 7 horas y en la cercanía de los drenes el NF alcanzaba al estrato inferior. El volumen de los drenes se redujo a partir de este tiempo y la profundidad llegó hasta 51.3 cm en 17 horas o lo equivalente a 13.7 cm de carga sobre los drenes en $L/2$.

Figura 8. Perfiles de agua observados



Fuente: Propia.

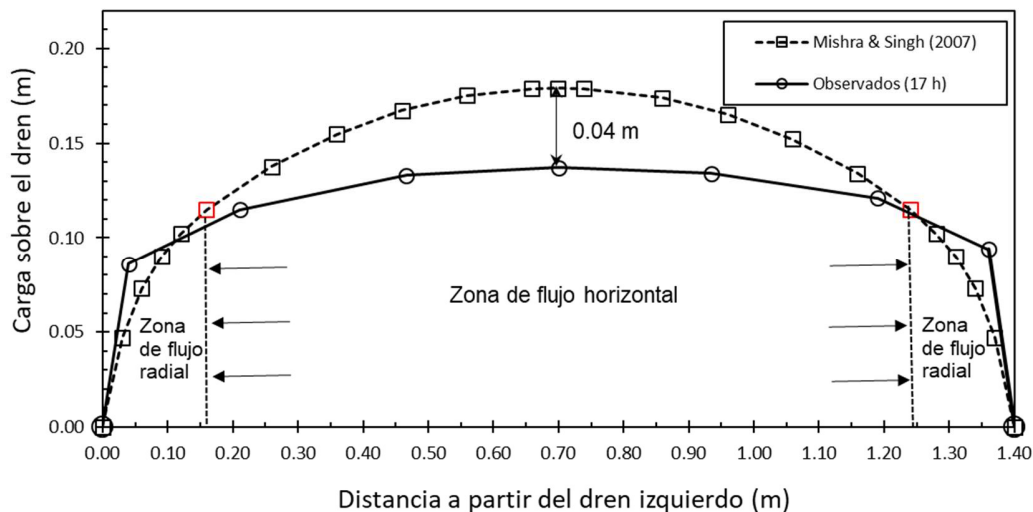
Puesto que el modelo matemático de Mishra y Sing (2007) aplica en drenaje en estado de flujo permanente, sus resultados fueron evaluados con los observados del perfil del NF para el tiempo de 17 horas, tiempo en el que terminó el drenado del exceso de agua (Figura 9). La zona de flujo radial calculado con las suposiciones de Mishra y Sing resultó de 0.159 cm, en esta zona el perfil freático observado no tiene punto de comparación debido a que el perfil simulado considera la carga sobre el dren igual a cero. Sin embargo, a partir de este punto hacia el eje de simetría es decir en la zona de flujo horizontal el perfil freático observado contra lo calculado muestra un error máximo de 4 cm en el centro. Con los resultados estadísticos mostrados en el cuadro 2 se observa que el modelo evaluado puede ser una buena alternativa para el diseño de drenes subterráneos en suelos agrícolas sujetos a condiciones de régimen permanente debido a que los valores están muy cercanos a los observados.

Tabla 2. Parámetros estadísticos.

ME	RMSE	CRM	CD	EF
0.043	26.28	0.196	0.239	-3.18994

Fuente: Elaboración con datos analizados.

Figura 9. Perfil del Nivel freático para un tiempo de 17 horas



Fuente: Propia.

Conclusiones

El modelo matemático de Mishra y Sing (2007) mostró una buena aproximación en el eje de simetría de los drenes en tiempos largos de drenado, con 4 cm de error a las 17 horas, pero la forma del perfil del NF es más curvo que el observado sobre todo en las cercanías de los drenes.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para desarrollar mis estudios.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por la oportunidad brinda para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández, por su apoyo y su valioso tiempo para guiarme en la realización de este trabajo, toda mi admiración por ser un excelente investigador.

Literatura Citada

Ayars, J. E.; Christen, E. W. and Hornbuckle, J. W. (2006). Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 86(1–2), 128–139.

Ayars, James E. and Evans, R. G. (2015). Subsurface Drainage - What's Next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392.

CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. [electrónica]. México. Disponible en http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/eam_2018.pdf

Darzi-Naftchally, A.; Majid Miriatifi, S. and Asgari, A. (2014). Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields : a case study in Northern Iran. *Paddy Water Environ*, 12, 103–111.

- FAO. (2014). *Perfil de país-México* (pp. 1–23). <https://doi.org/10.1787/9789264222052-4-es>.
- Hernández Facundo, A. (2020). Análisis de flujo subsuperficial y propuesta de drenaje subterráneo en "La Ceron" [Tesis de maestría no publicada]. Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.
- Hornbuckle, J. W., Christen, E. W., & Faulkner, R. D. (2007). Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality. *Agricultural Water Management*, 89(3), 208–216.
- ICID. INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, (2018). ICID DATABASE, World drained areas: <https://www.icid.org/world-drained-area.pdf>
- Inegi. (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. México. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2019/doc/irg_ena2019.pdf
- Mehdinejadani, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model for simulation of a water table profile between two parallel subsurface drains using fractional derivatives. *Computers and Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794.
- Mishra, G. C., & Singh, V. (2007). A new drain spacing formula. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 338–351.
- Namuche Vargas, J. R., Olvera Salgado, M. D., Saucedo Rojas, H. E., Fuentes Ruíz, C., & Arellano Monterrosas, J. L. (2020). Desarrollo y evolución del drenaje agrícola en México. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4), 1–26.
- Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 1–13.
- Rimidis, A., & Dierickx, W. (2004). Field research on the performance of various drainage materials in Lithuania. *Agricultural Water Management*, 68(2), 151–175.
- Zavala, M., Saucedo, H., Bautista, C., & Fuentes, C. (2012). Comparison of Two Nonlinear Radiation Models for Agricultural Subsurface Drainage. *Drainage Systems*, 8, 165–180.

Título del libro: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático
ISBN: 978-84-17853-72-3

Hydrus como una opción para el diseño del drenaje subterráneo

Ángel Hernández Facundo^{ad}, Jorge Víctor Prado Hernández^{bd} y Mauricio Carrillo García^{cd}

^a Estudiante de doctorado, Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo (al21130301@chapingo.mx).

^b Profesor Investigador, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo (jpradoh@chapingo.mx).

^c Profesor Investigador, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo (mcarrillog@chapingo.mx).

^d Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230, México.

Línea temática | Usos y gestión del agua

RESUMEN

La presencia de Nivel Freático (NF) subsuperficial en áreas agrícolas afecta el desarrollo de los cultivos y provoca la salinización del suelo, estos problemas asociados a niveles freáticos someros se han controlado mediante la instalación de sistemas de drenaje subterráneo. Una forma de estudiar este fenómeno es a través de la evaluación experimental de modelos matemáticos, con la cual se pueden controlar las variables de entradas y salidas. En este trabajo se midió la variación del NF provocado por dos drenes paralelos instalados en un perfil de suelo saturado y se comparó con la modelación dinámica de agua utilizando Hydrus-2D[®] que resuelve numéricamente la ecuación de Richards. El modelo físico experimental tenía dimensiones de 2.44x1.22x122 m y contenía un perfil de suelo de 0.9 m de espesor compuesto por un estrato franco y otro franco arcilloso, las Conductividades Hidráulicas (Ks) fueron de 24.96 y 6.24 cm/día respectivamente; se instalaron nueve Pozos de Observación (PO) de 3 cm de diámetro en el centro del experimento conectados a piezómetros externos para medir la profundidad del NF durante 17 h. Los resultados mostraron que el modelo Hydrus-2D se ajusta mejor en tiempos mayores a 10 h debido a que el RMSE varió de 14.96 a 1.03 cm, en el caso de la EF cambió de -52.45 a -0.43, por lo tanto, se considera que Hydrus-2D puede ser una herramienta útil para el diseño de drenajes subterráneos parcelarios.

INTRODUCCIÓN

Las áreas cultivables disminuyen debido a la salinización del suelo, erosión y urbanización. Es necesario aumentar sustancialmente la producción de cultivos en las áreas húmedas, además se requiere de la agricultura de riego para proveer grandes proporciones de alimento en las regiones áridas y húmedas (Ayars y Evans, 2015). El drenaje agrícola artificial elimina el exceso de agua que afecta el desarrollo y producción de cultivos del perfil del suelo, además, facilita la remoción de sales permitiendo la recuperación de estas zonas agrícolas (Oyarce et al., 2017; Rimidis y Dierickx, 2004).

Por otro lado el modelo HYDRUS ha sido aplicado con éxito en diversos temas de riego y drenaje, como la simulación del flujo de agua y el transporte de solutos en el riego por surcos (Crevoisier et al., 2008), volumen de suelo mojado en riego por goteo superficial y subsuperficial (Monjezi et al. 2013), tasas de descarga de drenaje subsuperficial y concentraciones químicas en el agua de drenaje (Boivin et al., 2006), y el movimiento de sales y movimiento del agua en el suelo bajo el cultivo de arroz regado con diferentes salinidades del agua (Phogat et al., 2010). De tal manera que este trabajo tuvo como objetivo evaluar el modelo Hydrus-2D[®] en un sistema de drenaje agrícola subterráneo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo físico experimental. El módulo experimental se construyó con una estructura desarmable de aluminio de 2.44 m de largo, 1.24 m de ancho y 1.24 m de altura, con paredes de acrílico transparente; los drenes paralelos tenían una separación $L = 1.40$ m colocados a 0.25 m de altura y 0.52 m de los laterales; los PO se instalaron con longitudes a partir de lado

izquierdo de 0.45, 0.56, 0.73, 0.986, 1.22, 1.454, 1.71, 1.88 y 1.99 m quedando en el centro del experimento, en la parte inferior de cada PO se conectó un piezómetro y se colocó en la pared externa para la medición manual. El proceso consistía en saturar el perfil de suelo a través de dos tubos ranurados de 10 cm de diámetro que atravesaban los dos estratos colocados en la parte posterior del experimento, cuando el suelo se saturaba y los piezómetros estaban en el mismo nivel se abrían los drenes subterráneos para medir las profundidades del NF en los nueve piezómetros (Figura 1).

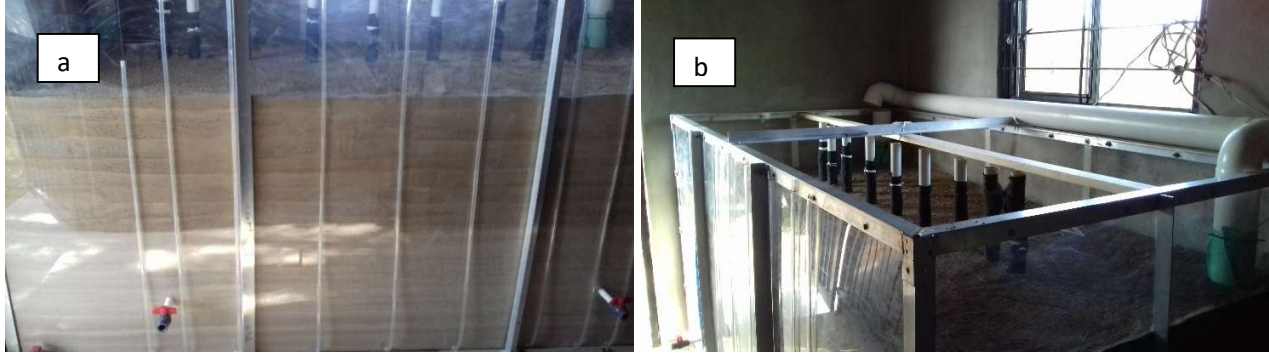


Figura 1 | Módulo experimental; a) Drenes subterráneos instalados en perfil de suelo de 0.9m de espesor, b) Ubicación de Pozos de Observación.

Simulación de la dinámica del agua en el suelo. El paquete de software Hydrus-2D utilizado en este estudio es un modelo numérico de elementos finitos que simula el transporte transitorio o acumulativo de agua y solutos en medios porosos variablemente saturados, basado en la forma bidimensional o tridimensional de la ecuación de Richards (Ebrahimian y Noory, 2015). La ecuación de Richards (Šimůnek et al. 1999) se muestra a continuación:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r_x} \frac{\partial}{\partial x} \left[x K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (1)$$

Donde θ es el contenido de agua en el suelo (cm^3/cm^3), t es el tiempo (min), x es la coordenada horizontal (cm), $K(h)$ es la conductividad hidráulica (cm/min), h es el potencial total de agua en el suelo (cm), y z es la coordenada vertical y es positiva hacia arriba (cm).

Las propiedades hidráulicas del suelo fueron modeladas usando las relaciones de van Genuchten – Mualem (Genuchten V M, 1980; Mualem, 1976).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - 1/n \quad (4)$$

Donde θ_s es el contenido de agua en el suelo a saturación (cm^3/cm^3), θ_r es el contenido residual de agua en el suelo (cm^3/cm^3), m , n y α ($1/\text{cm}$) son parámetros de ajuste y K_s es la conductividad hidráulica a saturación (cm/min).

Condiciones iniciales y de frontera. Se consideró un dominio de flujo de 90 cm de profundidad y 244 cm de ancho. La discretización espacial se realizó con elementos triangulares de dimensión de 0.5 cm en la zona de los drenes y 2 cm en las caras sin flujo, la presión se consideró $h=0$ debido que el suelo se consideró saturado. (Figura 2).

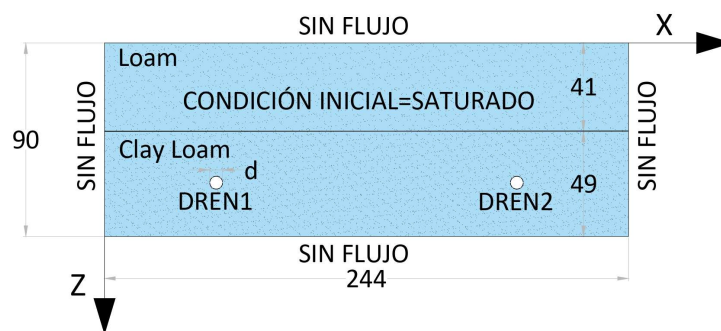


Figura 2 | Condiciones iniciales y de frontera.

Características físicas del suelo. Las características de los dos estratos utilizados en el módulo experimental se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 | Características del suelo utilizado en el modelo obtenidos de Hydrus-2D (Carsel F. y Parrish S., 1988).

Estrato	Espesor (m)	Textura	K_s (cm/día)	θ_r (adim)	θ_s (adim)	n (adim)
4	0.49	Franco	24.96	0.078	0.43	1.56
5	0.41	Franco arcilloso (Clay Loam)	6.24	0.095	0.41	1.31

Evaluación del desempeño del modelo. El modelo matemático se evaluó con la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), y eficiencia del modelo (EF) las ecuaciones se muestran a continuación:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i' - h_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2 - \sum_{i=1}^N (h_i' - h_i)^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (6)$$

donde h_i es la i -ésima carga simulada (m), h_i' es la i -ésima carga observada (m), $\bar{h}$ es la media de las cargas observadas (m), y N es el número de datos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 3 se observa que en tiempos menores a 10 h existe una EF de -52.45 lo que indica que los datos obtenidos con Hydrus 2D no predicen correctamente y están por debajo del dato observado en este tiempo, aunque la tendencia del nivel freático (forma) es similar. Después de este periodo y cuando el NF pasa al estrato de suelo inferior la RMSE disminuye considerablemente llegando hasta 1.036 cm y una EF = -0.43. En la Tabla 2 se muestran los resultados estadísticos del desempeño del modelo Hydrus-2D que constatan lo dicho previamente; en tiempos largos (14 y 17 horas) los perfiles del nivel freático prácticamente se sobreponen. El comportamiento de lo modelado indica que los valores propuestos por Carsel F. y Parrish S. (1988) de los parámetros de las funciones de van Genuchten – Mualem pueden ser una buena referencia para predecir el comportamiento del nivel freático en drenaje subterráneo, pero pueden requerir un ajuste para mejorar la predicción como en el caso del estrato de suelo uno.

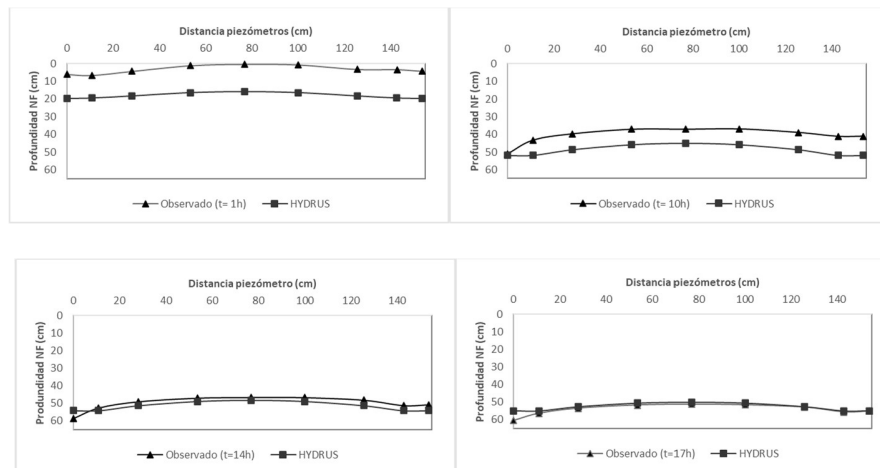


Figura 3 | Evolución temporal del Nivel Freático observado y simulado

Tabla 2 | Resultado de los parámetros estadísticos para simulaciones en HYDRUS 2D de la profundidad del NF.

	1h	2h	3h	4h	7h	10h	14h	17h
RMSE (%)	14.962	22.037	22.972	21.6	15.16	9.067	2.322	1.036
EF	-52.45	-97.44	-105.8	-96.61	-48.8	-16.8	-1.08	-0.43

CONCLUSIONES

El modelo Hydrus 2D puede ser una herramienta útil para el diseño de drenaje parcelario subterráneo pues predice satisfactoriamente el comportamiento del nivel freático en suelos estratificados.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico para realizar este trabajo. Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández por el asesoramiento y guía brindada, así como al Dr. Mauricio Carrillo García y Dr. Agustín Ruíz García.

REFERENCIAS

- Ayars, J. E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface Drainage - What's Next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392. <https://doi.org/10.1002/ird.1893>
- Boivin, A., Šimůnek, J., Schiavon, M., & Genuchten, M. T. (2006). Comparison of Pesticide Transport Processes in Three Tile-Drained Field Soils Using HYDRUS-2D. *Vadose Zone Journal*, 5(3), 838–849. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0089>
- Carsel F., R., & Parrish S., R. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755–769. *Water Resources Research*, 24(5), 755–769.
- Crevoisier, D., Popova, Z., Mailhol, J. C., & Ruelle, P. (2008). Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 95(4), 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.10.021>

- Ebrahimian, H., & Noory, H. (2015). Modeling paddy field subsurface drainage using HYDRUS-2D. *Paddy and Water Environment*, 13(4), 477–485. <https://doi.org/10.1007/s10333-014-0465-8>
- Fuentes, C., Zavala, M., & Saucedo, H. (2009). Relationship between the Storage Coefficient and the Soil-Water Retention Curve in Subsurface Agricultural Drainage Systems: Water Table Drawdown. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(3), 279–285. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2009\)135:3\(279\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2009)135:3(279))
- Genuchten V M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- Halbac-cotoara-zamfir, R., & Costescu, I. (2010). *Calculation of distance between drains in controlled regime.pdf*. 42(3), 1–7.
- Monjezi, M. S., Ebrahimian, H., Liaghat, A., & Moradi, M. A. (2013). Soil-wetting front in surface and subsurface drip irrigation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 166(5), 272–284. <https://doi.org/10.1680/wama.12.00065>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conduc. *Water Resources Research*, 12(3), 513–522.
- Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001134)
- Phogat, V., Yadav, A. K., Malik, R. S., Kumar, S., & Cox, J. (2010). Simulation of salt and water movement and estimation of water productivity of rice crop irrigated with saline water. *Paddy and Water Environment*, 8(4), 333–346. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0213-7>
- Provenzano, G. (2007). Using Hydrus 2-D Simulation Model to Evaluate Wetted Soil Volume in Subsurface Drip Irrigation Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(6), 878–879. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2008\)134:6\(878\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:6(878))
- Rimidis, A., & Dierickx, W. (2004). Field research on the performance of various drainage materials in Lithuania. *Agricultural Water Management*, 68(2), 151–175. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.03.004>

Aceptado para su publicación como capítulo del libro derivado del congreso: 14° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas. Se le asignará ISBN.

Evaluación de ecuación unidimensional de Boussinesq para el diseño de drenes subterráneos parcelarios

Ángel Hernández Facundo¹, Jorge Víctor Prado Hernández² y Mauricio Carrillo García³

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México., al21130301@chapingo.mx

²Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México., Correo autor de correspondencia: jpradoh@chapingo.mx

³Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México. mcarrillo@chapingo.mx

Mesa 1: Matemáticas y física.

Resumen

El diseño de sistemas de drenaje agrícola subterráneo requiere modelos matemáticos que describan con precisión el perfil de la carga hidráulica sobre los drenes bajo diferentes configuraciones de diseño y tipos de suelo. En este trabajo se evaluó la ecuación unidimensional de Boussinesq en régimen transitorio, utilizada para el diseño de drenes subterráneos, mediante modelos físicos en laboratorio. El primer experimento se desarrolló en un perfil heterogéneo arcilloso compuesto por dos estratos, mientras que en una segunda prueba se empleó un perfil homogéneo de suelo arenoso. Las conductividades hidráulicas se obtuvieron mediante el programa SPAW, y la porosidad drenable se calculó a partir de las humedades a capacidad de campo y saturación. Los resultados mostraron que, en el suelo arcilloso, el modelo presentó un ajuste sobresaliente con valores de $RMSE = 0.037$ m, $R^2 = 0.982$ y $NSE = 0.94$, lo que evidencia su alta capacidad predictiva en condiciones de baja permeabilidad. En contraste, en el suelo arenoso se alcanzó un ajuste aceptable ($RMSE = 0.060$ m, $R^2 = 0.943$, $NSE = 0.74$), aunque con menor precisión debido a la rápida respuesta del nivel freático en medios de alta transmisividad. En conjunto, los resultados confirman que la ecuación de Boussinesq constituye una herramienta confiable para el diseño de drenajes agrícolas, con mayor robustez en suelos de textura fina, pero con necesidad de parametrización más cuidadosa en suelos arenosos, lo que aporta evidencia experimental relevante para el diseño de drenajes en condiciones contrastantes en México.

Palabras clave: Drenaje subterráneo, modelos físicos experimentales, evaluación matemática, suelo arcilloso, suelo arenoso.

Abstract

The design of subsurface agricultural drainage systems requires mathematical models that accurately describe the hydraulic head profile toward drains under different design configurations and soil types. In this study, the one-dimensional Boussinesq equation in a transient regime, commonly used for the design of subsurface drains, was evaluated through laboratory physical models. The first experiment was conducted on a heterogeneous clay profile composed of two strata, while the second test used a homogeneous sandy soil profile. Hydraulic conductivities were obtained using the SPAW program, and drainable porosity was calculated from the difference between field capacity and saturation moisture contents. The results showed that, in clay soil, the model presented an outstanding fit with values of $RMSE = 0.037$ m, $R^2 = 0.982$, and $NSE = 0.94$,

demonstrating its high predictive capacity under low-permeability conditions. In contrast, in sandy soil, an acceptable fit was achieved ($RMSE = 0.060$ m, $R^2 = 0.943$, $NSE = 0.74$), although with lower accuracy due to the rapid response of the water table in high-transmissivity media. Overall, the results confirm that the Boussinesq equation is a reliable tool for the design of agricultural drainage systems, showing greater robustness in fine-textured soils but requiring more careful parameterization in sandy soils, thus providing relevant experimental evidence for drainage design under contrasting conditions in Mexico.

Keywords: Subsurface drainage, experimental physical models, mathematical evaluation, clay soil, sandy soil.

Introducción

Incrementar la productividad agrícola no solo consiste en optimizar el uso del agua disponible, sino también en recuperar suelos agrícolas afectados por anegamiento y salinización, que cada año reducen la superficie productiva en distritos y unidades de riego. En regiones del trópico húmedo y en zonas irrigadas del centro del país, la saturación prolongada del suelo y la acumulación de sales han limitado el potencial agrícola y amenazan la seguridad alimentaria. Frente a este panorama, el drenaje agrícola subterráneo se reconoce como una práctica fundamental para controlar el nivel freático, mejorar la aireación del suelo y reducir la salinidad (Hornbuckle et al., 2007; Darzi-Naftchally et al., 2014; Ritzema, 2006).

El diseño de sistemas de drenaje subterráneo depende en gran medida de modelos matemáticos que describen el movimiento del agua subterránea, con el fin de garantizar una profundidad óptima del nivel freático que permita el adecuado desarrollo de los cultivos. Tradicionalmente, las ecuaciones de régimen permanente han sido ampliamente utilizadas debido a su simplicidad y bajos requerimientos de datos (Ernst, 1974; Skaggs & van Schilfegaarde, 1999). Sin embargo, sus supuestos de recarga constante y nivel freático estable en el tiempo no representan adecuadamente las condiciones reales en sistemas de riego o en regiones con alta variabilidad climática, lo que puede conducir a diseños poco eficientes o sobredimensionados (Ritzema, 2006; Namuche-Vargas et al., 2020). En tales contextos, las ecuaciones de régimen transitorio ofrecen una mejor aproximación, ya que permiten modelar la evolución temporal del drenaje y de la lámina freática bajo diferentes escenarios de recarga (Singh et al., 2021; Mehdinejadani et al., 2013).

Dentro de este marco, la ecuación unidimensional de Boussinesq constituye un modelo clásico para describir el flujo subterráneo no estacionario hacia drenes paralelos (Boussinesq, 1904; Kirkham, 1958). Su utilidad radica en que proporciona una base analítica para representar la dinámica del nivel freático en condiciones de drenaje transitorio.

No obstante, la mayoría de los estudios experimentales se han realizado en suelos arcillosos o en estratos homogéneos de baja conductividad hidráulica (Zavala et al., 2012; Darzi-Naftchally et al., 2014; Oyarce et al., 2017), mientras que las aplicaciones en suelos de textura ligera, como los arenosos, han sido menos frecuentes, pese a que en ellos la alta permeabilidad y la rápida respuesta hidráulica generan condiciones de drenaje distintas (Ramos et al., 2015; Saxton & Rawls, 2006).

Diversos estudios han ampliado la aplicabilidad del modelo. Fuentes et al. (2009) y Chávez et al. (2011) reportan que la incorporación de un coeficiente de almacenamiento variable y la porosidad drenable permite representar con mayor precisión la retención de agua y la profundidad acumulada de drenaje en condiciones de laboratorio y simulación numérica. Duarte et al. (2001) demostraron que la formulación Boussinesq–Glover se ajusta mejor a configuraciones con drenes sobre capas

impermeables. Zimmer et al. (2023) y Trejo & Saucedo Rojas (2022) validaron el modelo en campo, mostrando que con una calibración adecuada es posible predecir caudales drenados con una eficiencia Kling–Gupta superior a 0.5 en suelos limosos. Asimismo, esquemas implícitos y modelos de tipo Hele–Shaw (Tzimopoulos & Terzidis, 1975; Ram & Chauhan, 1987; Guitjens & Luthin, 1965) han mostrado buen ajuste en condiciones de pendiente suave, aunque tienden a sobreestimar el espaciamiento de drenes en pendientes mayores al 30%. En experimentos de laboratorio, Gupta et al. (1994) evidenciaron que la consideración de porosidad drenable variable puede reducir el error de predicción en más del 70%. De igual manera, simulaciones computacionales (Skaggs, 1991) subrayan la necesidad de corregir el efecto de flujo radial cerca de los drenes.

En conjunto, estas investigaciones respaldan que la ecuación unidimensional de Boussinesq, con una parametrización cuidadosa particularmente del coeficiente de almacenamiento y la porosidad drenable, constituye un marco robusto para modelar el comportamiento del drenaje agrícola subterráneo en condiciones contrastantes, tanto en medios homogéneos y altamente permeables (suelos arenosos) como en configuraciones heterogéneas y de baja conductividad (suelos arcillosos).

En este estudio se plantea la evaluación experimental de la ecuación de Boussinesq en régimen transitorio mediante la construcción de modelos físicos en laboratorio. El primer experimento se realizó en 2021 con un perfil arcilloso compuesto por dos estratos, mientras que un segundo experimento se efectuó en 2025 en un perfil homogéneo de suelo arenoso representativo de las áreas agrícolas de Huactzingo, Tlaxcala, México. El objetivo es analizar la capacidad predictiva de la ecuación frente a mediciones experimentales del nivel freático en dos condiciones de suelo contrastantes y discutir su aplicabilidad en el diseño de sistemas de drenaje agrícola. Este enfoque aporta evidencia experimental que contribuye a mejorar el diseño de sistemas de drenaje en zonas agrícolas mexicanas, donde la variabilidad climática, la heterogeneidad edáfica y las presiones derivadas de la seguridad alimentaria demandan la validación de modelos matemáticos adaptados a condiciones locales.

Materiales y métodos

Modelo físico experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en el Campo Experimental Tlapeaxco del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México. Se realizaron dos modelos físicos experimentales en distintos periodos. El primer experimento, desarrollado en 2021, consistió en un perfil arcilloso estratificado y fue descrito previamente en el 10° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas (Hernández-Facundo y Prado-Hernández, 2021), donde se evaluó la ecuación de régimen permanente de Mishra y Singh (2007). En el presente trabajo se retoma como antecedente metodológico y no se describe nuevamente en detalle.

El segundo experimento, realizado en 2025 se utilizó un suelo de textura arenosa, recolectado en una parcela agrícola del municipio de San Juan Huactzingo, Tlaxcala, México, a una profundidad de 20 cm, procurando mantener las propiedades físicas representativas del horizonte superficial (Figura 1). La selección de este suelo se basó en su homogeneidad estructural, alta permeabilidad y baja capacidad de retención hídrica, características que permiten un flujo subterráneo uniforme y contrastan con las condiciones del suelo arcilloso evaluado previamente.



Figura 1. Extracción de suelo arenoso en áreas agrícolas de Huactzingo, Tlaxcala, México.

En términos generales, el modelo físico experimental representó el proceso de drenaje agrícola subterráneo bajo dos configuraciones de suelo: uno homogéneo (Figura 2b) y otro heterogéneo (Figura 2a). El montaje incluyó un contenedor con suelo, un sistema de saturación y drenaje, así como dispositivos de medición de la carga hidráulica, lo que permitió registrar la variación espacio-temporal de la carga hidráulica (h) en condiciones controladas de laboratorio, lo que facilitó la validación experimental de la ecuación de Boussinesq en ambos escenarios de textura.

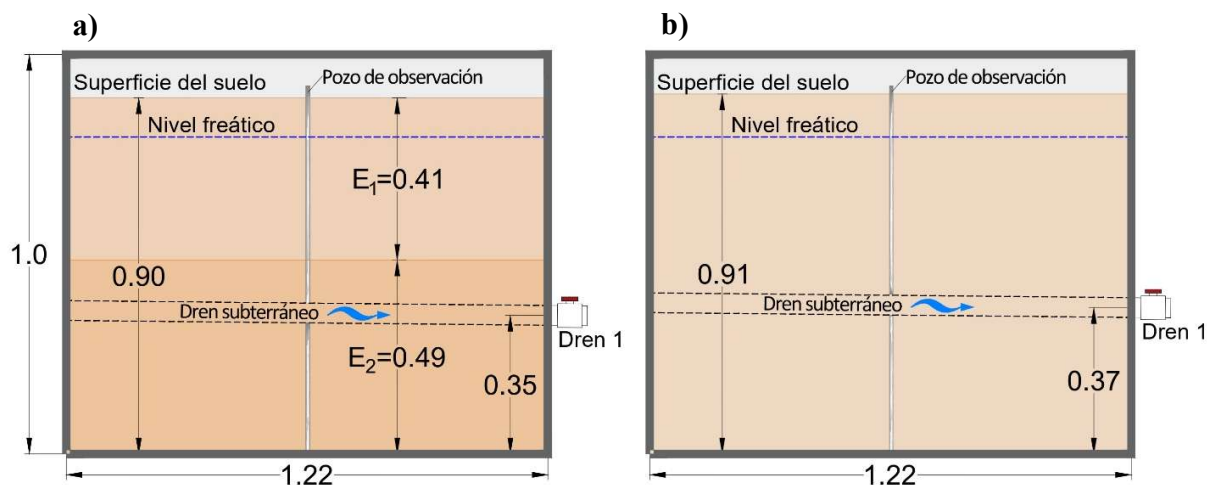


Figura 2. Vista lateral de diseño experimental: a) suelo heterogéneo con un estrato franco (E_1) y otro Franco arcilloso (E_2) y b) suelo homogéneo arenoso.

En el perfil de suelo arcilloso, las mediciones de la carga hidráulica se realizaron mediante siete pozos de observación (P) ubicados a lo largo del eje longitudinal del contenedor, a distancias de 0.04, 0.21, 0.47, 0.70, 0.93, 1.19 y 1.36 m a partir del dren izquierdo (Dren 1). En el caso del suelo arenoso, se emplearon 15 pozos de observación localizados a distancias de 0.06, 0.11, 0.18, 0.25, 0.32, 0.40, 0.48, 0.58, 0.70, 0.82, 1.02, 1.22, 1.42, 1.64 y 1.88 m a partir del dren izquierdo (Dren 1) (Figura 3). Los drenes subterráneos, de 52 mm de diámetro nominal, se instalaron con una

pendiente del 1%, cumpliendo con las especificaciones de superficie de drenaje recomendadas por la FAO (2002).

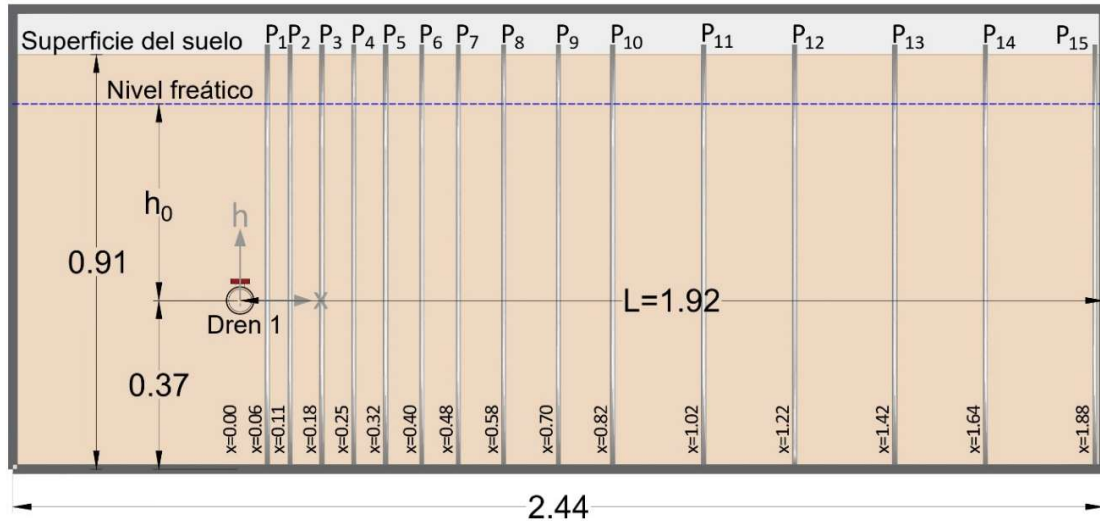


Figura 3. Vista frontal del modelo experimental para un suelo homogéneo con suelo arenoso.

Los experimentos consistieron en saturar el perfil de suelo hasta alcanzar una altura inicial de carga (h_0) y, posteriormente, abrir el dren correspondiente para iniciar el proceso de vaciado. En el suelo arcilloso, la carga inicial fue de 0.48 m, con un periodo de observación de 90 minutos, registrando datos cada 10 minutos. En el suelo arenoso, la carga inicial fue de 0.47 m, con un tiempo total de observación de 45 minutos, registrando datos cada 5 minutos. En ambos casos se obtuvo la evolución completa del nivel freático durante el proceso de drenaje. Para representar una separación entre drenes de 3.84 m, se asumió simetría en el perfil experimental, de manera que los datos medidos desde el dren hasta $L/2$ permiten caracterizar todo el perfil.

Parámetros hidráulicos del suelo

La conductividad hidráulica saturada (K) se estimó mediante funciones de pedotransferencia implementadas en el software SPAW (Soil-Plant-Air-Water), desarrollado por el USDA Agricultural Research Service, el cual permite calcular propiedades hidráulicas del suelo a partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla obtenidos en laboratorio (Saxton & Willey, 2005). La porosidad efectiva (n) se determinó como la diferencia entre el contenido volumétrico de agua a saturación (θ_s) y el correspondiente a la capacidad de campo (θ_{cc}), representando el volumen de poros que contribuyen efectivamente al flujo de agua en el suelo (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Características físicas del suelo arcilloso.

Estrato	Espesor (m)	Textura	θ_{cc} (%)	θ_s (%)	D_a (g cm ⁻³)	K Estimada (m día ⁻¹)	n (adimensional)
E1	0.49	Franca	37.25	57.51	1.22	0.2160	0.2026
E2	0.41	Franca-arcillosa	31.87	46.76	1.46	0.3161	0.1489

Tabla 2. Características físicas del suelo arenoso.

Estrato	Espesor (m)	Textura	θ_{cc} (%)	θ_s (%)	Da (g cm ⁻³)	K Estimada (m día ⁻¹)	n (adimensional)
E1	0.91	arenosa	8.45	16.43	1.54	3.1865	0.0798

Modelo de Boussinesq unidimensional

El descenso del flujo subterráneo hacia los drenes se simuló mediante la ecuación unidimensional de Boussinesq, en su forma linealizada para condiciones transitorias (Boussinesq, 1904; Bear, 1972). Este modelo describe la dinámica del agua en medios porosos saturados, simplificando la influencia de la zona no saturada a través del parámetro de porosidad efectiva (Bouwer, 1978; Kirkham & Powers, 1972). En condiciones de recarga vertical uniforme y simetría respecto al plano medio entre drenes, la ecuación diferencial se expresa como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{n} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) \right) - \frac{K}{nL} (h - h_d) \quad (1)$$

Donde $h(x, t)$ es la carga hidráulica (m), K conductividad hidráulica (m/d), n porosidad efectiva (adimensional), r es la coordenada radial desde el dren (m), L es el espaciamiento entre drenes (m), h_d es la carga hidráulica considerando el diámetro del dren (m) y t tiempo (d).

Este planteamiento ha servido de base para numerosos desarrollos teóricos y numéricos en el diseño y evaluación de sistemas de drenaje agrícola (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1962; Skaggs, 1999), así como para la validación de modelos físico-matemáticos en condiciones de campo y laboratorio (Ayars & Evans, 2015; Oosterbaan, 2019).

Discretización numérica

La ecuación diferencial se resolvió mediante el esquema implícito-explicito de Crank-Nicolson, que es de segundo orden en espacio y tiempo, y garantiza estabilidad numérica en problemas de difusión (Smith, 1985; Thomas, 1995).

$$\begin{aligned} \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = & \frac{K}{2n} \left[\frac{h_{i+1,j}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{h_{i+1,j}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} \right] \\ & + \frac{K}{2n} \left[\frac{1}{r_j} \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta r} + \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_j} \frac{h_{i,j+1}^n - h_{i,j-1}^n}{2\Delta r} \right. \\ & \left. + \frac{h_{i,j+1}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{\Delta r^2} \right] - \frac{K}{nL} \left(\frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j}^n}{2} \right) + \frac{K}{nL} h_d \end{aligned} \quad (2)$$

La ecuación de Boussinesq discretizada en una malla (i,j) se puede expresar en forma matricial como un sistema de ecuaciones lineales:

$$Ah^{n+1} = Bh^n + d \quad (3)$$

donde h^{n+1} es el vector de cargas en el nuevo tiempo $n + 1$, h^n es el vector de alturas en el tiempo actual n , A es la matriz de coeficientes del sistema implícito, B es la matriz de coeficientes del sistema explícito y d es un vector de términos independientes.

Condiciones iniciales y de frontera

Como condición inicial se estableció una carga hidráulica uniforme en todo el dominio, $h(x, 0) = h_0$, donde h_0 corresponde a la carga inicial medida experimentalmente. Asimismo, se aplicaron condiciones de frontera tipo Dirichlet, imponiendo carga hidráulica nula en los extremos $h(0, t) = 0$, $h(L, t) = 0$, lo cual representa el efecto de drenes ubicados en los bordes del dominio.

Evaluación del modelo matemático

La representatividad de la carga (h) y del caudal estimado con los modelos matemáticos se evaluaron mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), la correlación producto-momento de Pearson (Coeficiente de Determinación) (R^2), y Eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (NSE).

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\bar{h}_i} \quad (4)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h}_i) (\hat{h}_i - \bar{\hat{h}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{h}_i - \bar{\hat{h}}_i)^2}} \right]^2 \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h}_i)^2} \quad (6)$$

donde $\hat{h}_i$ es la carga simulada (m), h_i es la carga observada (m), $\bar{h}_i$ es el promedio de datos observados, $\bar{\hat{h}}_i$ es el promedio de datos simulados y N es el número de datos de entrada.

Resultados y discusión

En el experimento con suelo arcilloso estratificado, la evaluación del modelo de Boussinesq en régimen transitorio evidenció un ajuste sobresaliente con los datos experimentales observados en un periodo de 90 minutos (Figura 4). El valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.037 m, indicando una diferencia mínima entre los niveles freáticos simulados y los medidos. El coeficiente de correlación (R^2) alcanzó 0.982, lo que refleja una correspondencia casi perfecta entre valores observados y estimados. Por su parte, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) fue de 0.94, confirmando la alta capacidad del modelo para reproducir la dinámica de descenso de la carga hidráulica en condiciones de baja conductividad hidráulica. Estos resultados demuestran que la ecuación de Boussinesq constituye una herramienta confiable para describir el comportamiento del drenaje en suelos arcillosos, donde el flujo subterráneo es lento y la respuesta del sistema está dominada por la capacidad de almacenamiento.

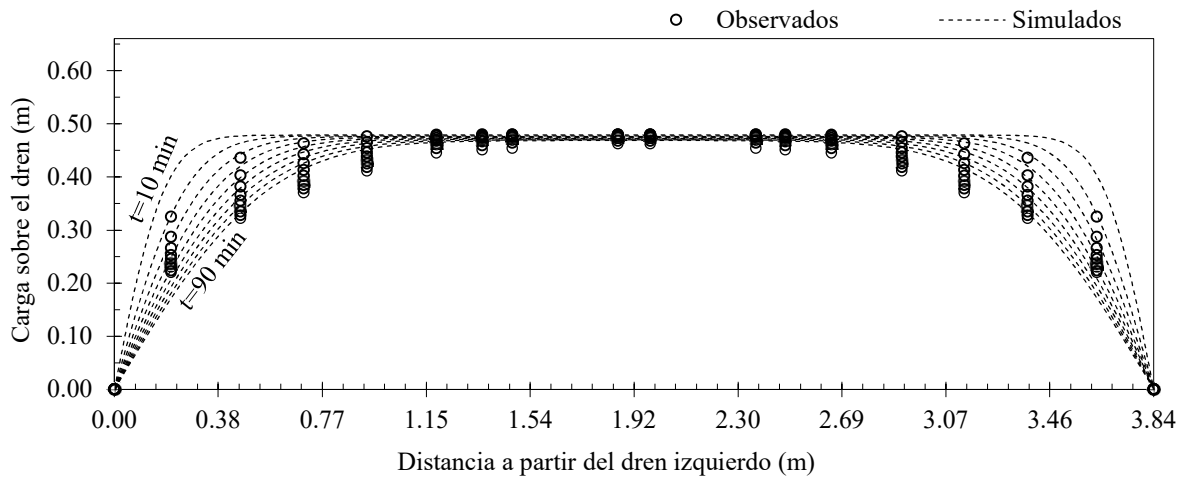


Figura 4. Comparación entre la carga hidráulica simulada con la ecuación unidimensional de Boussinesq y la observada experimentalmente en el suelo arcilloso, para un tiempo de $t = 90$ minutos.

En el experimento con suelo arenoso homogéneo (Huactzingo, Tlaxcala, 2025), la evaluación del modelo de Boussinesq mostró un ajuste aceptable, aunque con menor precisión que en el suelo arcilloso (Figura 5). El valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.060 m, lo que indica una mayor dispersión entre los niveles freáticos simulados y los observados. El coeficiente de correlación (r) alcanzó 0.94, lo que refleja una relación fuerte pero no tan estrecha como en el suelo arcilloso. El coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) fue de 0.74, lo que sugiere una capacidad predictiva moderada del modelo. Estos resultados confirman que, en suelos de textura ligera con alta permeabilidad, la ecuación de Boussinesq tiende a subestimar o sobrestimar transiciones rápidas del nivel freático, siendo más sensible a la parametrización de la porosidad efectiva y la conductividad hidráulica.

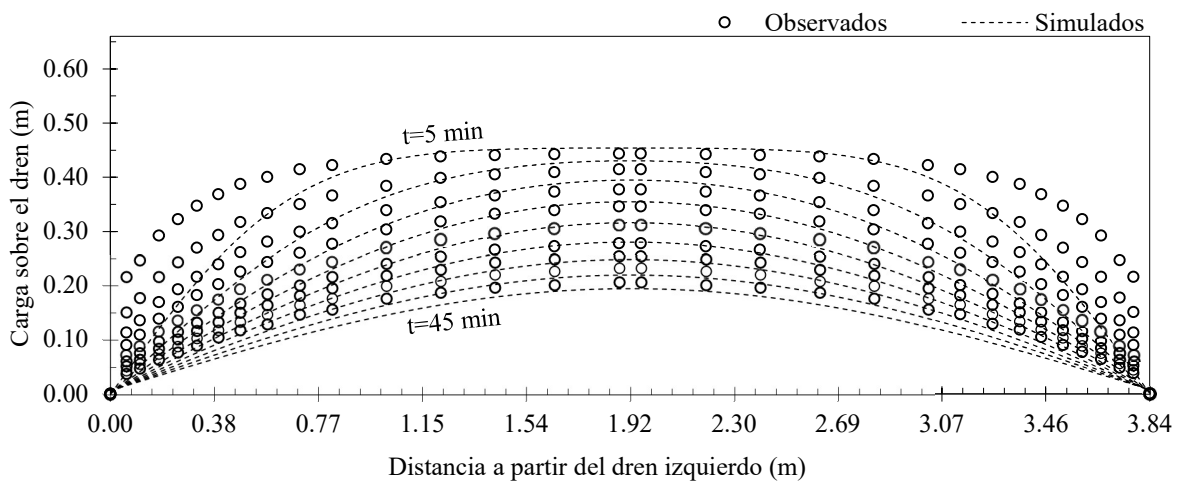


Figura 5. Comparación entre la carga hidráulica simulada con la ecuación unidimensional de Boussinesq y la observada experimentalmente en el suelo arenoso, para un tiempo de $t = 45$ minutos.

La comparación de los dos experimentos revela diferencias importantes en el desempeño del modelo de Boussinesq según la textura del suelo. En el suelo arcilloso estratificado, los indicadores estadísticos evidencian una capacidad predictiva sobresaliente ($RMSE = 0.037$ m; $R^2 = 0.982$; $NSE = 0.94$), lo que confirma la aplicabilidad del modelo en medios de baja conductividad hidráulica y elevada capacidad de almacenamiento. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zavala et al. (2012) y Darzi-Naftchally et al. (2014), quienes observaron que la ecuación reproduce adecuadamente la dinámica del nivel freático en suelos finos con respuesta lenta.

Por el contrario, en el suelo arenoso homogéneo, aunque se alcanzó un ajuste aceptable ($RMSE = 0.060$ m; $R^2 = 0.943$; $NSE = 0.74$), el modelo mostró menor precisión, reflejando las limitaciones de la formulación linealizada para capturar los descensos rápidos del nivel freático en medios de alta permeabilidad. Estudios previos señalan que, en suelos ligeros, la parametrización de la porosidad drenable y el coeficiente de almacenamiento es crítica para mejorar la simulación (Fuentes et al., 2009; Chávez et al., 2011). Asimismo, Zimmer et al. (2023) destacan que, en suelos limosos y arenosos, la calibración del parámetro de almacenamiento es determinante para que la ecuación logre reproducir con fidelidad la respuesta de drenaje.

En conjunto, estos resultados sugieren que la ecuación de Boussinesq es más robusta en suelos de textura fina, mientras que en suelos arenosos su desempeño depende fuertemente de la correcta estimación de parámetros hidráulicos, lo cual representa un área de mejora y de futuras investigaciones en el diseño de drenajes agrícolas en contextos de textura ligera.

Conclusiones

La ecuación de Boussinesq es más confiable en suelos de textura fina, mientras que en suelos ligeros requiere una calibración más detallada de parámetros hidráulicos para mejorar su aplicabilidad. La investigación aporta evidencia experimental inédita en México sobre el desempeño del modelo bajo condiciones contrastantes de suelo, contribuyendo a la mejora de criterios de diseño parcelario de drenajes agrícolas y a la recuperación de superficies afectadas por anegamiento y salinidad.

Literatura Citada

- Ayars, J. E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface drainage – What’s next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392. <https://doi.org/10.1002/ird.1909>
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Elsevier.
- Boussinesq, J. (1904). *Recherches théoriques sur l’écoulement des nappes d’eau infiltrées dans le sol. Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10(2), 5–78.
- Bouwer, H. (1978). *Groundwater hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Chávez, C., Fuentes, C., & Aceves, E. (2011). Evaluation of Boussinesq-based models for subsurface drainage. *Agricultural Water Management*, 98(5), 867–875. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.013>
- Darzi-Naftchally, A., Miriatifi, S. M., & Asgari, A. (2014). Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields: A case study in Northern Iran. *Paddy and Water Environment*, 12(1), 103–111. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0361-7>

- Ernst, L. F. (1974). *Drainage principles and applications*. Wageningen: ILRI.
- Ernst, L. F. (1962). Groundwater flow in homogeneous soils. *Journal of Hydrology*, 1(1), 22–29. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(63\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(63)90003-0)
- Fuentes, C., Chávez, C., & Ramos, J. (2009). Laboratory validation of Boussinesq drainage equations. *Irrigation Science*, 27(2), 125–134. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0120-4>
- Guitjens, J. C., & Luthin, J. N. (1965). Drain spacing under unsteady flow conditions. *Transactions of the ASAE*, 8(4), 499–502. <https://doi.org/10.13031/2013.40520>
- Gupta, R. K., Prasad, K., & Singh, H. (1994). Laboratory evaluation of drainable porosity variability in subsurface drainage. *Journal of Hydrology*, 162(1–2), 47–63. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90102-3)
- Hernández-Facundo, Á., & Prado-Hernández, J. V. (2021, octubre 21–22). *Evaluación de ecuación de régimen permanente para el diseño de drenes subterráneos parcelarios*. En 10° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Hooghoudt, S. B. (1940). *General consideration of the problem of field drainage by parallel drains, ditches, watercourses and channels*. Wageningen: ILRI.
- Kirkham, D. (1958). Seepage of steady rainfall through soil into drains. *Transactions of the American Geophysical Union*, 39(5), 892–908. <https://doi.org/10.1029/TR039i005p00892>
- Kirkham, D., & Powers, W. L. (1972). *Advanced soil physics*. New York: Wiley-Interscience.
- Mehdinejadi, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model for simulation of a water table profile between two parallel subsurface drains using fractional derivatives. *Computers & Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.05.020>
- Mishra, G. C., & Singh, V. (2007). A new drain spacing formula. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 338–351. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.2.338>
- Namuche-Vargas, J. R., Olvera-Salgado, M. D., Saucedo-Rojas, H. E., Fuentes-Ruiz, C., & Arellano-Monterrosas, J. L. (2020). Desarrollo y evolución del drenaje agrícola en México. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4), 1–26. <https://doi.org/10.47808/revistaia.v9i4.142>
- Oosterbaan, R. J. (2019). *Drainage research in agricultural development*. Wageningen: ILRI.
- Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001150](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001150)
- Ramos, S., Ortiz, C., & López, R. (2015). Influencia de la materia orgánica en las propiedades hidráulicas de Vertisoles. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 135–144.
- Ram, S., & Chauhan, H. S. (1987). Analytical solutions for unsteady subsurface drainage. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 113(2), 202–214. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1987\)113:2\(202\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1987)113:2(202))

- Ritzema, H. P. (2006). *Drainage principles and applications* (2nd ed.). Wageningen: ILRI.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Saxton, K. E., & Willey, P. H. (2005). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. *Environmental Modelling & Software*, 20(7), 725–740. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.005>
- Skaggs, R. W. (1991). Modeling subsurface drainage. *Agricultural Water Management*, 19(3), 227–242. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(91\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0378-3774(91)90033-4)
- Skaggs, R. W., & van Schilfgaarde, J. (1999). *Agricultural drainage*. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA.
- Smith, G. D. (1985). *Numerical solution of partial differential equations: Finite difference methods*. Oxford: Clarendon Press.
- Thomas, J. W. (1995). *Numerical partial differential equations: Finite difference methods*. New York: Springer.
- Trejo, E., & Saucedo-Rojas, J. (2022). Aplicación de la ecuación de Boussinesq en drenaje agrícola: validación de campo en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Agrícola*, 8(1), 23–34.
- Tzimopoulos, C. D., & Terzidis, A. (1975). Drain spacing by unsteady-state theory. *Journal of Hydrology*, 27(1–2), 101–110. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(75\)90101-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(75)90101-9)
- Zavala, M., Saucedo, H., Bautista, C., & Fuentes, C. (2012). Análisis de ecuaciones de drenaje subterráneo en condiciones experimentales. *Revista Mexicana de Ingeniería Agrícola*, 6(2), 45–54.
- Zimmer, D., Henine, H., & Jeantet, L. (2023). Integrated subsurface drainage theory from Boussinesq equation validation. *Water Resources Research*, 59(5), e2022WR032251. <https://doi.org/10.1029/2022WR032251>

6 CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados demostraron que la capacidad predictiva de los modelos matemáticos empleados para el diseño de drenaje subterráneo parcelario depende de forma decisiva del origen y la calidad de los parámetros hidráulicos utilizados. Se comprobó que la representatividad de las ecuaciones de Hooghoudt y Glover–Dumm, tanto en sus versiones clásicas como modificadas, se ve limitada cuando se emplean propiedades hidráulicas estimadas mediante funciones de pedotransferencia, especialmente en el suelo heterogéneo. Las sobrestimaciones recurrentes de la conductividad hidráulica y la macroporosidad generaron curvas de abatimiento poco coherentes y redujeron la correspondencia entre las simulaciones y el comportamiento físico de la carga hidráulica sobre los drenes, lo que confirma que las FPT presentan un rango restringido de aplicabilidad en el suelo de perfil heterogéneo con textura franca.

El uso de parámetros hidráulicos obtenidos experimentalmente permitió mejorar significativamente la efectividad de los modelos evaluados. La incorporación de valores medidos de K y μ reprodujo con mayor precisión la dinámica del flujo en los dos perfiles de suelos estudiados, particularmente en la ecuación de Glover–Dumm en régimen transitorio, que mostró el desempeño más robusto bajo condiciones reales de abatimiento. Las ecuaciones de Hooghoudt mantuvieron una respuesta satisfactoria en el suelo arenoso, en concordancia con sus supuestos teóricos de homogeneidad.

Los hallazgos permiten aceptar la hipótesis de la tesis, ya que se evidenció que las diferencias entre parámetros estimados y medidos influyen de manera significativa en la exactitud y estabilidad de las simulaciones de la carga hidráulica sobre los drenes (perfil del agua), afectando directamente la confiabilidad del diseño de drenaje subterráneo. La tesis aporta evidencia experimental que demuestra, bajo las mismas condiciones de flujo, cómo los modelos clásicos y modificados responden de forma contrastante según la fuente de información hidrodinámica de los suelos, y establece que los parámetros experimentales proporcionan predicciones más coherentes y útiles para el dimensionamiento de drenes. Asimismo, se verificó la relevancia hidráulica de la relación $h/D \leq 1.5$ para garantizar la validez de los modelos transitorios, relación la cual se

aproxima al supuesto de Glover-Dumm para simplificar la ecuación de Boussinesq. Finalmente, se confirma que las funciones de pedotransferencia requieren ajuste o calibración cuando se aplican en suelos con más de un estrato, en perfiles donde cada horizonte presenta propiedades hidráulicas distintas, como variaciones en K y μ , o en suelos con heterogeneidad espacial marcada, donde estos parámetros pueden cambiar de manera notable entre puntos cercanos.

Estos resultados fortalecen el sustento técnico para promover el uso de información experimental en el diseño de drenaje parcelario y contribuyen a mejorar la confiabilidad del espaciamiento y la profundidad de drenes en condiciones reales de campo, favoreciendo sistemas de drenaje más eficientes y sostenibles.

7 ANEXO

PONENCIAS EN CONGRESOS			
Número	Título de la ponencia	Congreso	Fecha
1	Evaluación de la ecuación de régimen permanente para el diseño de drenes subterráneos parcelarios	Décimo Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas	21–22 oct 2021
2	HYDRUS como una opción para el diseño del drenaje subterráneo	VII Jornada de Ingeniería del Agua, Cartagena España	18–19 oct 2023
3	Evaluación de la ecuación de Glover-Dumm para el diseño de drenes subterráneos parcelarios	XIII Congreso Internacional y XXVII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas (CINCA 2025)	22–25 abr 2025
4	Evaluación de la ecuación unidimensional de Boussinesq para el diseño de drenes subterráneos parcelarios	14° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas	23–24 oct 2025