

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA

EVALUACIÓN DEL MODELO DE CULTIVO HORTSYST
BAJO UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE EN
INVERNADERO CON FERTIRRIEGO

TESIS DE GRADO

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

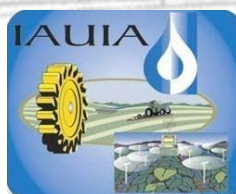
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA

Presenta:

VICTOR HUGO MENESES RAMIREZ

Bajo la supervisión de:

JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ, Dr.



Chapingo, Estado de México, Noviembre de 2024

**EVALUACIÓN DEL MODELO DE CULTIVO HORTSYST BAJO UN SISTEMA
DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE EN INVERNADERO CON FERTIRRIEGO**

Tesis realizada por **VICTOR HUGO MENESES RAMIREZ** 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. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR:


DR. AGUSTÍN RUÍZ GARCÍA

LECTOR EXTERNO:


Dr. CANDIDO MENDOZA PEREZ

CONTENIDO

CONTENIDO.....	iii
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
DEDICATORIAS	x
AGRADECIMIENTOS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xiv
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Estructura de la tesis.....	5
1.6 Literatura citada	6
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1 Producción de cultivos en invernadero.....	10
2.2 Modelación del agua en el suelo	11

2.3	Modelos de crecimiento de cultivos.....	14
2.4	Literatura citada	16
3	HYDRUS 2D COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL	21
3.1	Resumen.....	21
3.2	Abstract.....	22
3.3	Introducción.....	22
3.4	Materiales y métodos	25
3.4.1	Modelo físico experimental	25
3.4.2	Pruebas de riego	26
3.4.3	Modelo matemático	27
3.4.4	Evaluación del desempeño del modelo	31
3.5	Resultados	32
3.5.1	Con valores de los parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con Rosetta32	
3.5.2	Optimización de los parámetros hidráulicos del suelo	33
3.5.3	Modelación con las dos estrategias de representación del contenido inicial de agua en el suelo	34
3.5.4	Robustez del modelo	36
3.6	Discusión.....	37
3.6.1	Estimación de parámetros hidráulicos del suelo con funciones de pedotransferencia de Rosetta.....	37
3.6.2	Optimización de los parámetros hidráulicos del suelo	38

3.6.3	Dinámica del contenido del agua del suelo con las dos estrategias de representación de contenido inicial de agua en el suelo.....	40
3.6.4	Validez del modelo sujeto a factores de operación del riego y condición del suelo.....	40
3.7	Conclusiones.....	43
3.8	Literatura citada	43
4	EVALUACIÓN DEL MODELO HORTSYST BAJO UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE TOMATE EN FERTIRRIEGO.....	49
4.1	Resumen.....	49
4.2	Abstract.....	51
4.3	Introducción.....	51
4.4	Materiales y métodos	53
4.4.1	Sitio experimental	53
4.4.2	Establecimiento del cultivo	54
4.4.3	Programación de riego y manejo de solución nutritiva.....	55
4.4.4	Datos climáticos y contenido volumétrico de agua del suelo	56
4.4.5	Determinación de la evapotranspiración del cultivo	56
4.4.6	Medición del rendimiento del cultivo	58
4.4.7	Descripción del modelo HortSyst.....	59
4.4.8	Evaluación del desempeño del modelo	61
4.5	Resultados y discusión.....	62
4.5.1	Clima dentro del invernadero.....	62
4.5.2	Evapotranspiración del cultivo	64

4.5.3	Desempeño del modelo.....	66
4.6	Conclusiones.....	69
4.7	Literatura citada	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Pruebas de riego realizadas en el modelo físico experimental	27
Cuadro 3.2. Contenido inicial de agua en el suelo ($\theta\theta i$) en las estrategias de representación uniforme (EST1) y por estratos (EST2) de las pruebas de riego realizadas en el modelo físico experimental.....	30
Cuadro 3.3. Conjuntos de valores de los parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con diferentes funciones de pedotransferencia de Rosetta.....	31
Cuadro 3.4. Desempeño de la modelación de la prueba de riego R3 con cinco conjuntos de valores de parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con funciones de pedotransferencia de Rosetta.	33
Cuadro 3.5. Valores de los parámetros de la ecuación de van Genuchten-Mualem, obtenidos con simulación inversa y utilizados en las simulaciones de las ocho pruebas de riego para las dos estrategias de representación de $\theta\theta i$ (EST1 y EST2).....	34
Cuadro 3.6. Desempeño del modelo de simulación para las dos estrategias de representación del contenido inicial de agua en el suelo EST1 y EST2.....	35
Cuadro 4.1. Propiedades químicas del suelo.	54
Cuadro 4.2. Parámetros de calidad del agua de riego.....	54
Cuadro 4.3. Parámetros del modelo de crecimiento HortSyst	60
Cuadro 4.4. Componentes del balance hídrico del cultivo de tomate de los ciclos de cultivo 2023 y 2024	64
Cuadro 4.5. Desempeño del modelo HortSyst para las variables ETc y rendimiento de los ciclos de cultivo 2023 y 2024.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Modelo físico experimental. A) Vista lateral. B) Vista en planta.	26
Figura 3.2. A) Dominio computacional de flujo y condiciones de frontera. B) Ubicación de sensores en el dominio de flujo y estratos de suelo definidos para la simulación en HYDRUS 2D. Los valores entre paréntesis indican la distancia horizontal al emisor y la altura de los puntos de monitoreo de la humedad en el suelo ($\theta\theta$)	29
Figura 3.3. Contenidos de agua en el suelo en las ocho pruebas de riego para las estrategias de representación de la humedad inicial en el suelo EST1 (línea continua) y EST2 (línea punteada). Los círculos representan los valores observados y las líneas los simulados. El color azul representa la tendencia de los valores en la ubicación (0,75), el color anaranjado los valores en la ubicación (10,65), y la línea verde los valores en la ubicación (20,55).	35
Figura 4.1. Puntos de medición del contenido volumétrico de agua en el suelo con sensores puntuales y sonda multi-profundidad. A) ciclo 2023. B) Ciclo 2024.	57
Figura 4.2. Área de influencia de los puntos de medición para el cálculo de $\theta\theta$. A) Ciclo 2023. B) Ciclo 2024.	58
Figura 4.3. Comportamiento de las variables de entrada del modelo HortSys medidas dentro del invernadero a lo largo de los ciclos de cultivo A) Temperatura del aire (T_a), B) Humedad relativa (HR), C) Radiación global (R_g). Las líneas azules corresponden a los valores medidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores medido durante el ciclo 2024.	63
Figura 4.4. Valores diarios de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) observado y simulado con el modelo HortSyst durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Las líneas azules corresponden a los valores obtenidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores obtenido durante el ciclo 2024.	65

Figura 4.5. Evapotranspiración acumulada del cultivo (ETc) observada y simulada con HortSyst a lo largo de los ciclos 2023 y 2024. Las líneas azules corresponden a los valores obtenidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores obtenido durante el ciclo 2024.....	66
Figura 4.6. Evolución temporal del rendimiento observado y simulado con HortSyst durante el ciclo de cultivo 2023 y 2024. Las líneas azules corresponden a los valores obtenidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores obtenido durante el ciclo 2024.....	68

DEDICATORIAS

A mis padres Gabriel y Micaela por su apoyo incondicional, por toda una vida de esfuerzo y sacrificios, porque ellos siempre están a mi lado brindándome consejos y enseñanzas para hacer de mí una mejor persona.

A Sandra y Gabriel por su compañía, palabras de aliento y los sacrificios hechos para poder lograr este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca recibida de estudios de posgrado.

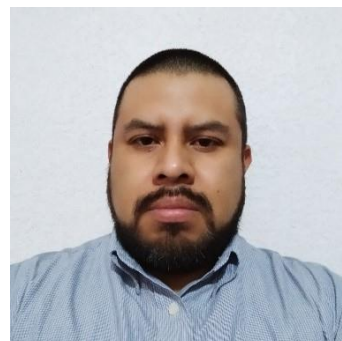
A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de seguir con mi preparación académica y poder finalizar mis estudios de posgrado.

Al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por la oportunidad y confianza recibida, en especial a cada uno de los profesores y el personal administrativo.

A cada uno de los miembros del comité asesor, al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández por la dirección y apoyo durante el proceso; al Dr. Agustín Ruiz García y al Dr. Noé Velázquez López por las recomendaciones para mejorar el trabajo, cada uno de ellos aportó su conocimiento para la conclusión de esta investigación.

A los compañeros y amigos quienes compartieron experiencias y conocimientos que serán útiles para mi desarrollo profesional.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Victor Hugo Meneses Ramirez
Fecha de nacimiento	30 de julio de 1987
Lugar de nacimiento	Tlaxcala, Tlaxcala
CURP	MERV870730HTLNMCO7

Desarrollo académico

Licenciatura:	Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos (Céd. Prof. 12216566)
Maestría en Ciencias	Hidrociencias (Céd. Prof. 12508107)

Trayectoria

El autor de la presente tesis se ha desempeñado como especialista en la elaboración de proyectos ejecutivos de infraestructura hidroagrícola, realizando actividades como topografía, diseño, instalación y supervisión de sistemas de riego presurizado, supervisión de obra pública y elaboración de sistemas de Información geográfica.

RESUMEN GENERAL

EVALUACIÓN DEL MODELO DE CULTIVO HORTSYST BAJO UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE EN INVERNADERO CON FERTIRRIEGO

HortSyst es un modelo de crecimiento de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) para sistemas hidropónicos en invernadero el cual permite ajustar programas de nutrición del cultivo y riego. HortSyst asume que el cultivo no presenta limitación de agua en sistemas hidropónicos; sin embargo, en condiciones de cultivo en suelo si se pueden presentar limitaciones debido a las características hidráulicas del suelo. En este sentido, la presente investigación plantea adecuar el modelo HortSyst a sistemas de producción de jitomate en suelo en invernadero con fertirriego. Para estudiar la dinámica del agua en el suelo, se comparó el comportamiento de la humedad en el suelo resultado de simulaciones de pruebas de riego por goteo de un modelo generado en HYDRUS 2D con los datos observados en un modelo físico experimental. También se evaluó el modelo HortSyst para predecir la evapotranspiración del cultivo (ETc) de jitomate en un sistema de fertirriego en invernadero, en cuyo caso se compararon los valores de ETc observados mediante un balance hídrico y los simulados por el modelo HortSyst de dos ciclos de cultivo 2023 y 2024. Las predicciones del contenido de agua en el suelo del modelo HYDRUS 2D concuerdan con los valores observados, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) osciló entre 0.010 y 0.084 cm³ cm⁻³ y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) entre 0.660 y 0.996. Los parámetros estadísticos mostraron un buen desempeño del modelo HortSyst durante el ciclo 2023, con valores de NSE de 0.852 y de RMSE de 178.21 mm. En el ciclo 2024 el desempeño del modelo disminuyó considerablemente, con valores de NSE de 0.183 y de RMSE de 355.48 mm. Los resultados muestran el potencial del modelo HortSyst para predecir la ETc en suelo y la factibilidad de acoplarlo a un modelo que represente el comportamiento del agua en el suelo

Palabras clave: Evapotranspiración del cultivo, balance hídrico, modelo de crecimiento, fertirriego.

Tesis de Doctorado en ingeniería
Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Víctor Hugo Meneses Ramírez
Director de Tesis: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

GENERAL ABSTRACT

EVALUATION OF THE HORTSYST GROWTH MODEL UNDER A TOMATO PRODUCTION SYSTEM WITH FERTIRIGATION IN A GREEN HOUSE

HortSyst is a tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growth model for greenhouse hydroponic systems which allows adjusting crop nutrition and irrigation programs. HortSyst assumes that the crop does not have water limitations in hydroponic systems; however, in soil cultivation conditions there are many limitations due to the hydraulic characteristics of the soil. In this sense, this research proposes adapting the HortSyst model to tomato production systems in the greenhouse soil with fertigation. To study the dynamics of water in the soil, the behaviour of soil moisture resulting from simulations of drip irrigation tests of a model generated in HYDRUS 2D was compared with the data observed in an experimental physical model. The HortSyst model was also evaluated to predict crop evapotranspiration (ET_c) of the tomatoes in a greenhouse fertigation system, in which the ET_c values observed through a water balance and those simulated by the HortSyst model of two cycles 2023 and 2024. Were compared the predictions of the content of water in the soil from the HYDRUS 2D model coincide with the observed values, the root mean square error (RMSE) ranged between 0.010 and 0.084 cm³ cm⁻³ and the Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) between 0.660 and 0.996. The statistical parameters showed good performance of the HortSyst model during the 2023 cycle, with NSE values of 0.852 and RMSE of 178.21 mm. In the 2024 cycle, the performance of the model decreased considerably, with NSE values of 0.183 and RMSE of 355.48 mm. The results show the potential of the HortSyst model to predict the ET_c in soil and feasibility of coupling it to a model that represents the behaviour of water in soil.

Key words: HYDRUS 2D, drip, irrigation crop, evapotranspiration, water balance, growth model.

Doctoral thesis

Postgraduate in Agricultural Engineering and Integral Use of Water, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Victor Hugo Meneses Ramirez

Advisor: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Ante la escasez de recursos hídricos agravada por el cambio climático y la limitada superficie de tierra cultivable, la agricultura tiene el reto de alimentar a una población en aumento (Zhe et al., 2020). Bajo estas condiciones, es necesario tender a sistemas de producción agrícola en condiciones más controladas y racionales con el fin de incrementar la producción y productividad de los insumos agrícolas y en especial del agua de riego. (Baena et al., 2003). En este sentido, la potencialización de la producción de los cultivos se debe basar en una comprensión profunda de los diversos requerimientos climáticos de las plantas, la disponibilidad de nutrientes y agua en el suelo, los mecanismos de absorción de agua y nutrientes de las plantas así como las prácticas de manejo de los cultivos y la infraestructura agrícola disponible (Gallardo et al., 2020; Vereecken et al., 2016).

La integración de los factores que intervienen en los sistemas de producción bajo el enfoque de sistemas basados en modelos de simulación de crecimiento de cultivos, permite diseñar prácticas de manejo encaminadas a incrementar la productividad de los sistemas de producción con una gestión sostenible de los recursos utilizados (Jones et al., 2017; Martinez-Ruiz et al., 2019).

El estudio de modelos de crecimiento de cultivo en un enfoque de sistemas dinámicos, permite simular el crecimiento y la producción del cultivo en un contexto de las condiciones reales del cultivo (Gallardo et al., 2020). Estos modelos cuentan con funciones que permiten describir el cambio de estado de los sistemas como una respuesta a las condiciones externas como el clima, el suelo, el riego y prácticas de manejo del cultivo; de este modo, estos modelos han proporcionado un mayor entendimiento de las interacciones entre el suelo, la planta, el clima y los ciclos de nutrientes (Jones et al., 2017; Pelak et al., 2017).

En los numerosos modelos de crecimiento de cultivo disponibles, con diferentes

niveles de complejidad, el requerimiento y la disponibilidad del agua son insumos básicos para la simulación (Siad et al., 2019). Sin embargo, la mayoría de los modelos utilizan un enfoque conceptual unidimensional, para caracterizar la dinámica del almacenamiento de agua en el suelo. Los enfoques basados en principios físicos conservativos de la mecánica general para simular el flujo del agua en el suelo, integrados en modelos dinámicos de crecimiento de cultivos son escasos (Vereecken et al., 2016).

Se han desarrollado varios modelos matemáticos para mejorar el conocimiento de los sistemas de cultivo en invernadero. En particular, se han propuesto varios modelos para el cultivo de tomate como TOMGRO (Jones et al., 1991), TOMSIM (Heuevelink, 1999), TOMPOUSSE (Abreu et al., 2000), entre otros, que ayudan a simular el comportamiento de los sistemas de producción. Sin embargo, algunos de estos modelos son muy complejos porque involucran muchas variables de estado, variables de entrada o parámetros que dificultan su implementación (Martinez-Ruiz et al., 2019). Además, estos modelos asumen que no existe limitación de agua y nutrientes para el cultivo, por lo cual la absorción de nutrientes y agua está en función de su demanda (Ramírez Pérez et al., 2018). Sin embargo, en condiciones de cultivo en suelo se pueden presentar limitaciones de agua debido a las características hidráulicas del suelo. En este sentido la comprensión de cuando, cuanto y en donde las plantas absorben el agua del suelo es esencial para generar estrategias de riego efectivas, así como el diseño y la gestión de los sistemas de riego por goteo. (Sun et al., 2023; Zhang et al., 2023).

En los sistemas de riego por goteo superficial, la infiltración y redistribución espacial del agua de riego y en consecuencia de las raíces, está limitado a un pequeño volumen de suelo debajo del emisor (Romero et al., 2015). Considerando que los cultivos solo pueden consumir el agua del suelo que se encuentra al alcance de sus raíces, la cantidad de agua aplicada por los sistemas de riego por goteo debe ser suficiente para generar un volumen de suelo mojado que coincida con el patrón de enraizamiento del cultivo (Chen et al., 2014; Patel

& Rajput, 2008).

La forma del patrón de humedecimiento y el volumen total humedecido debajo de un gotero varia ampliamente en función de los parámetros hidráulicos del suelo y las prácticas de aplicación del riego (Cristóbal-Muñoz et al., 2022; Skaggs et al., 2010). Una mala comprensión del efecto de las propiedades hidráulicas del suelo y el manejo del riego en la distribución del agua del suelo puede ocasionar una baja eficiencia en el uso del agua (Patel & Rajput, 2008). De este modo, es indispensable comprender el efecto de las propiedades hidráulicas del suelo, descarga de los emisores, la frecuencia y tiempos de riego en el proceso de infiltración y redistribución del agua en el suelo, así como, la absorción de agua de los cultivos (Mubarak et al., 2009).

Las simulaciones de la dinámica del agua en el suelo durante y después de la aplicación del riego permitirá un mejor entendimiento de los procesos que interactúan en el fenómeno de distribución del agua en el suelo, mejorar la estimación de tasas de evapotranspiración del cultivo y con ello mejorar las prácticas y programación del riego (Domínguez-Niño et al., 2020; Siad et al., 2019). La distribución espacio temporal del agua en el suelo debajo de un gotero puede ser determinada experimentalmente, el cual es un proceso muy complejo y específico para cada sitio, o se puede simular con modelos matemáticos como la ecuación de Richards (Soulis & Elmaloglou, 2016).

La ecuación de Richards expresa la variación del contenido de agua en función del tiempo y de la posición (Martinez et al., 2013). Debido a la alta no linealidad de la ecuación de Richards, los problemas de filtración y movimiento del agua en suelos no saturados son difíciles de resolver analíticamente, excepto en el caso de geometrías muy simples y condiciones iniciales y de contorno específicas, por lo cual frecuentemente se resuelve mediante métodos numéricos (Chen et al., 2024; Soulis & Elmaloglou, 2016).

El software HYDRUS 2D/3D es un modelo ampliamente utilizado que resuelve numéricamente mediante elemento finitos la ecuación de Richards y las

ecuaciones de advección dispersión para simular el flujo de agua, calor y solutos en medios porosos de saturación variable con límites geométricos irregulares y textura heterogénea en dos dimensiones (Morianou et al., 2023; J Šimůnek et al., 2012). Jirí Šimůnek et al. (2008) presentan el desarrollo de HYDRUS así como diferentes modelos y herramientas involucradas en el proceso de modelado de flujo de agua y transporte de solutos en suelos. Por su parte, Jiří Šimůnek et al. (2016) presentan una amplia revisión de las aplicaciones del software HYDRUS 2D entre las que destaca la aplicación de HYDRUS 2D para evaluar diferentes prácticas de riego y la absorción de agua y nutrientes por las raíces. Morianou et al. (2023) presentan una revisión de la aplicación de HYDRUS 2D para simular prácticas de riego por goteo, la absorción radicular y el transporte de solutos en cultivos perennes.

1.2 Planteamiento del problema

El modelo HortSyst es un modelo de crecimiento de cultivo que describe sistemas hidropónicos de producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. Fue desarrollado por Martínez-Ruiz et al. (2019) como un sistema de apoyo a la toma de decisiones. Mediante valores horarios de temperatura del aire, humedad relativa y radiación global, el modelo HortSyst permite ajustar programas de nutrición de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio así como la cuantificación de las necesidades de riego (Martínez-Ruiz et al., 2019; Martínez-Ruiz, Pineda-Pineda, et al., 2020; Martínez-Ruiz, Sánchez-García, et al., 2020). Es relevante resaltar que uno de los supuestos del modelo es que el cultivo se encuentra libre de estrés hídrico causado por limitaciones de agua en el medio de cultivo. Sin embargo, los procesos de distribución de agua, de aire, de desarrollo de las raíces, de la nutrición, el crecimiento de los cultivos y las prácticas de aplicación de riego, presentan diferencias significativas entre los sustratos espacialmente confinados de los sistemas hidropónicos y los suelos no confinados de sistemas de fertirriego.

1.3 Justificación

Por lo expuesto en el apartado anterior, el modelo HortSyst debe considerar el

proceso de infiltración y redistribución espacio-temporal del agua en el suelo, de modo que permita estimar las tasas de evapotranspiración del cultivo de tomate y adecuar las prácticas de riego en un sistema de producción de tomate en suelo como medio de cultivo. De este modo, en la presente investigación se evalúa la capacidad de predecir la evapotranspiración del cultivo del modelo HortSyst bajo un sistema de producción de jitomate en invernadero con fertirriego en suelo, además de identificar las variables y parámetros del modelo que afectan la predicción de la evapotranspiración del cultivo. Además se evalúa la capacidad de predicción del comportamiento espacio-temporal del agua en el suelo como una alternativa de acoplamiento al modelo HortSyst.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad del modelo HortSyst para estimar la evapotranspiración del cultivo bajo un sistema de producción de tomate en invernadero con fertirriego en suelo como medio de cultivo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar las funciones de pedotransferencia de Rosetta para determinar los valores de los parámetros hidráulicos del suelo.
- Analizar la configuración de las condiciones iniciales de humedad del suelo en HYDRUS 2D que generen las mejores predicciones de la dinámica espacio temporal de la humedad del suelo en riego por goteo superficial.
- Hacer un balance hídrico en el sistema de producción para estimar la evapotranspiración del cultivo.
- Identificar las variables y parámetros del modelo HortSyst que deban ajustarse para mejorar la predicción de la evapotranspiración del cultivo del sistema de producción en suelo.

1.5 Estructura de la tesis

En el capítulo dos se presenta una breve revisión acerca de los modelos

decrecimiento de cultivos, específicamente los utilizados para describir sistemas de producción de tomate. Se presenta además una breve revisión sobre la modelación del movimiento del agua en el suelo.

En el capítulo tres se analiza el potencial del software HYDRUS 2D para predecir la distribución espacio temporal del contenido agua en el suelo de ocho pruebas de riego por goteo superficial, realizadas en un modelo físico experimental. Además se compara el desempeño de las predicciones realizadas con diferentes fuentes de obtención de los valores de los parámetros hidráulicos del suelo tales como funciones de pedotransferencia de Rosetta y optimización por modelación inversa. También se realiza un análisis de dos estrategias de representación de las condiciones iniciales de humedad del suelo.

En el capítulo cuatro, se aborda la evaluación del modelo de crecimiento HortSyst para predecir la evapotranspiración del cultivo (ETc) bajo un sistema de producción de tomate en invernadero con fertirriego en suelo como medio de cultivo. Para ello se compararon valores de ETc simulados con el modelo Hortsyty y los obtenidos con un balance hídrico en dos ciclos de cultivo.

1.6 Literatura citada

- Abreu, P., Meneses, J. F., & Gary, C. (2000). Tompousse, a model of yield prediction for tomato crops: Calibration study for unheated plastic greenhouses. *Acta Horticulturae*, 519, 141–149. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2000.519.14>
- Baena, G., Ordoñez, R., Pastor, M., & González, P. (2003). Distribución en el bulbo húmedo de los nutrientes aplicados en fertirriego en olivar. *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, VI, 65–70. http://www.zonanosaturada.com/zns03/publications_files/p065-070.pdf
- Chen, L.-J., Feng, Q., Li, F.-R., & Li, C.-S. (2014). A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water. *Agricultural Water Management*, 146(December), 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.021>
- Chen, Y., Zheng, H., Huang, X., & Liu, S. (2024). Modeling variably saturated flows in porous media using the numerical manifold method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 169(PB), 106016.

<https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.106016>

- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. In *Water* (Vol. 14, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/w14111827>
- Domínguez-Niño, J. M., Arbat, G., Rajj-Hoffman, I., Kisekka, I., Girona, J., & Casadesús, J. (2020). Parameterization of Soil Hydraulic Parameters for HYDRUS-3D Simulation of Soil Water Dynamics in a Drip-Irrigated Orchard. *Water*, 12(7), 1858. <https://doi.org/10.3390/w12071858>
- Gallardo, M., Elia, A., & Thompson, R. B. (2020). Decision support systems and models for aiding irrigation and nutrient management of vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 240(October), 106209. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106209>
- Gohardoust, M. R., Šimůnek, J., Hardelauf, H., & Tuller, M. (2021). Adaptation and validation of the ParSWMS numerical code for simulation of water flow and solute transport in soilless greenhouse substrates. *Journal of Hydrology*, 596(December 2020), 106209. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126053>
- Heuevelink, E. (1999). Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development. *Annals of Botany*, 83(4), 413–422. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0832>
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L. H., Van Keulen, H., & Challa, H. (1991). A DYNAMIC TOMATO GROWTH AND YIELD MODEL (TOMGRO). *Transactions of the ASAE*, 34(2), 663–672. <https://doi.org/10.13031/2013.31715>
- Jones, James W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Munoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C., & Wheeler, T. R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>
- Martinez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., & Prado-Hernández, J. V. (2019). HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(1), 89–102. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000100089>
- Martinez-Ruiz, A., Pineda-Pineda, J., Ruiz-García, A., Prado-Hernández, J. V., López-Cruz, I. L., & Mendoza-Perez, C. (2020). The HORTSYST model extended to phosphorus uptake prediction for tomatoes in soilless culture.

Acta Horticulturae, 1271(1271), 301–306.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1271.41>

- Martinez-Ruiz, A., Sánchez-García, P., Pineda-Pineda, J., Prado-Hernández, J. V., & Ruiz-García, A. (2020). Prediction of nitrogen, phosphorus and potassium uptake using a photothermal model. *Acta Horticulturae*, 1296(1296), 469–476. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.61>
- Martinez, J. L., Schvezov, C. E., & Rosenberg, M. R. (2013). Aproximación en diferencias finitas a la ecuación de richards para transporte de agua en suelos no saturados. *Mecánica Computacional*, XXXII(33), 2779–2793. <http://hdl.handle.net/11336/9299>
- Morianou, G., Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2023). A Review of HYDRUS 2D/3D Applications for Simulations of Water Dynamics, Root Uptake and Solute Transport in Tree Crops under Drip Irrigation. *Water (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/w15040741>
- Mubarak, I., Mailhol, J. C., Angulo-Jaramillo, R., Bouarfa, S., & Ruelle, P. (2009). Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 96(11), 1547–1559. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.011>
- Patel, N., & Rajput, T. B. S. (2008). Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management*, 95(12), 1335–1349. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.002>
- Pelak, N., Revelli, R., & Porporato, A. (2017). A dynamical systems framework for crop models: Toward optimal fertilization and irrigation strategies under climatic variability. *Ecological Modelling*, 365, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.10.003>
- Ramírez Pérez, L. J., Morales Díaz, A. B., Benavides Mendoza, A., De Alba Romenus, K., González Morales, S., & Juárez Maldonado, A. (2018). Dynamic modeling of cucumber crop growth and uptake of N, P and K under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 234, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.068>
- Romero, P. J., Razuri, R. L., Peña, C., & Romero, E. (2015). Distribución de cationes en el bulbo humedo del fertirriego en el cultivo de pimentón (*Capsicum annuum* L .) Con cintas de goteo. *Conocimiento Libre y Licenciamiento*, 6(9), 120–131.
- Siad, S. M., Iacobellis, V., Zdruli, P., Gioia, A., Stavi, I., & Hoogenboom, G. (2019). A review of coupled hydrologic and crop growth models. *Agricultural Water Management*, 224(June), 105746. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105746>

- Šimůnek, J, van Genuchten, M., & Šejna, M. (2012). *The HYDRUS Software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Technical manual, Version 2.0.* (p. 258). Pc Progress.
- Šimůnek, Jiří, Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7), 1–25. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>
- Šimůnek, Jirí, van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2008). Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587–600. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., & Rothfuss, Y. (2010). Drip Irrigation Water Distribution Patterns: Effects of Emitter Rate, Pulsing, and Antecedent Water. *Soil Science Society of America Journal*, 74(6), 1886–1896. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0341>
- Soulis, K. X., & Elmaloglou, S. (2016). Optimum Soil Water Content Sensors Placement in Drip Irrigation Scheduling Systems: Concept of Time Stable Representative Positions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(11), 4016054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001093](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001093)
- Sun, L., Li, B., Yao, M., Mao, L., Zhao, M., Niu, H., Xu, Z., Wang, T., & Wang, J. (2023). Simulation of Soil Water Movement and Root Uptake under Mulched Drip Irrigation of Greenhouse Tomatoes. *Water*, 15(7), 1282. <https://doi.org/10.3390/w15071282>
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M. H., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S. D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., ... Young, I. M. (2016). Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15(5), 1–57. <https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>
- Zhang, J., Xiang, L., Zhu, C., Li, W., Jing, D., Zhang, L., Liu, Y., Li, T., & Li, J. (2023). Evaluating the irrigation schedules of greenhouse tomato by simulating soil water balance under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 283(February), 108323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108323>
- Zhe, G., Zhiming, Q., Rasika, B., Shouqi, Y., Xiyun, J., & Junzeng, X. (2020). Irrigation Scheduling Approaches and Applications: A Review. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(6), 4020007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001464)

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Producción de cultivos en invernadero

La producción de cultivos en invernadero aporta ventajas significativas sobre la producción a cielo abierto, ya que permite aislar al cultivo dentro del invernadero de condiciones adversas del ambiente externo y permite controlar factores como la temperatura, radiación, humedad relativa, concentración de CO₂, entre otros. (Juárez-Maldonado et al., 2017). Sin embargo, la producción sostenible en estos sistemas protegidos requiere de la comprensión de las condiciones micro climáticas dentro del invernadero y la disponibilidad de agua en el suelo (Saqib & Akbar Anjum, 2021).

En el caso específico del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero, la temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación solar tienen efecto sobre la producción del cultivo (de Oliveira et al., 2024; Shamshiri et al., 2018). En este sentido, se han desarrollado muchas investigaciones sobre los valores óptimos de estas variables, Shamshiri et al. (2018) presentan una revisión de valores óptimos de temperatura, humedad relativa y déficit de presión de vapor para las diferentes etapas de crecimiento de tomate.

Además del control del clima del invernadero, se requiere de una gestión adecuada del riego para incrementar la producción de los cultivos (Incrocci et al., 2020). Por consiguiente, en los sistemas de producción intensiva en invernadero se busca que el cultivo se encuentre bajo condiciones de producción potencial, es decir, que el crecimiento y la producción del cultivo se encuentre limitada únicamente por la radiación y temperatura del aire; además, se debe asegurar un suministro adecuado de nutrientes y mantener el contenido de agua en el suelo, a fin de que el cultivo mantenga las tasas máximas de evapotranspiración del cultivo (ET_c) (Incrocci et al., 2020; Vereecken et al., 2016). Por tanto, es necesario conocer la evapotranspiración del cultivo en escalas de tiempo muy pequeñas (horas o minutos) las cuales se pueden obtener mediante medición con lisímetros de pesaje, lisímetros de drenaje, midiendo el flujo de savia, entre

otros., estos métodos requieren de mucho tiempo además de ser costosos (Gallardo et al., 2020; Katsoulas & Stanghellini, 2019). Una alternativa a dichas dificultades es la estimación de la evapotranspiración mediante modelos de simulación; estos modelos calculan los requerimientos hídricos mediante un componente climático que considera los efectos del clima sobre la demanda de agua del cultivo y un componente del cultivo que considera el efecto de las características morfológicas de la planta sobre la demanda de agua (Gallardo et al., 2020).

Si bien, la programación del riego se puede realizar con simulaciones de la evapotranspiración del cultivo, es importante considerar la distribución espacio temporal del contenido de agua del suelo ya que condiciona la distribución de raíces en el suelo y la absorción de agua del cultivo (Sun et al., 2023). Por lo tanto, se requiere de estrategias de riego efectivas que involucren tanto el balance hídrico del suelo como la respuesta del cultivo sobre la disponibilidad de agua en el suelo (Zhang et al., 2023).

A pesar de la importancia de la programación del riego en la producción de cultivos en invernadero y aun cuando se han desarrollado diferentes métodos y herramientas para optimizar el riego de los cultivos en invernadero, la implementación de estas herramientas y modelos por los productores ha sido escasa y la programación del riego se basa en la experiencia de los productores y asesores técnicos (Incrocci et al., 2020).

2.2 Modelación del agua en el suelo

El rendimiento de los cultivos depende de diversos factores que interactúan en los componentes de los sistemas de producción: en la planta (fotosíntesis, respiración de crecimiento y mantenimiento, índice de área foliar, entre otros), en el clima (temperatura, radiación, concentración de CO₂, humedad relativa, entre otros), en el manejo agronómico (densidad de plantación, poda de hojas, fechas de siembra, programación y técnicas de aplicación de riego, entre otros) y en el suelo (las propiedades físicas y químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes

y agua en el suelo) (Gong et al., 2022; Saqib & Akbar Anjum, 2021).

Como se mencionó en el apartado anterior, la distribución espacio temporal del contenido de agua del suelo condiciona la distribución de raíces en el suelo y la absorción de agua del cultivo (Sun et al., 2023). En riego por goteo superficial, el volumen de suelo mojado es definido por la cantidad de agua necesaria para igualar al volumen de suelo donde se desarrolla la raíz (Bajpai & Kaushal, 2020; Chen et al., 2014). En consecuencia, es necesario una comprensión integral de cuándo y de donde los cultivos extraen el agua del suelo que permita mejorar la programación de riego por goteo así como el diseño de sistemas de riego por goteo superficial (Sun et al., 2023).

En riego por goteo superficial, la infiltración y redistribución del agua de riego está limitada por un pequeño volumen de suelo debajo del emisor (Romero et al., 2015). Este pequeño volumen humedecido es conocido como bulbo de humedecimiento o patrón de humedecimiento y está determinado por parámetros hidráulicos del suelo como: conductividad hidráulica del suelo, contenido inicial de agua del suelo, textura y estructura del suelo, entre otros; y por prácticas de aplicación del riego como: tasas de descarga de goteros, espaciamiento entre goteros, frecuencia y tiempo de riego, entre otros (Bajpai & Kaushal, 2020; Cristóbal-Muñoz et al., 2022; Skaggs et al., 2010). Bajpai & Kaushal (2020) presentan una revisión sobre el efecto de propiedades del suelo y prácticas de aplicación de riego en el patrón de humedecimiento.

El patrón de humedecimiento de riego por goteo se puede determinar mediante experimentación o mediciones directas en campo, lo cual es un proceso muy complejo y específico para cada sitio, por esta razón, los investigadores y diseñadores de sistemas de riego adoptaron diferentes modelos matemáticos para estimar el patrón de humedecimiento (Soulis & Elmaloglou, 2016; Subbaiah, 2013). Entre los modelos matemáticos desarrollados se encuentran los modelos empíricos, los modelos analíticos y los modelos numéricos (Subbaiah, 2013).

Los modelos empíricos se han desarrollado a partir de datos de campo o

laboratorio, utilizando varios métodos como análisis de regresión, análisis dimensional, métodos de inteligencia artificial, entre otros; estos modelos estiman las dimensiones del patrón de humedecimiento en función de algunas propiedades del suelo (conductividad hidráulica, contenido de agua en el suelo, densidad aparente del suelo, entre otros) y de parámetros de aplicación de los sistemas de riego por goteo (tiempo de riego y tasa de aplicación) (Karimi et al., 2020; Shiri et al., 2020).

Los modelos analíticos simulan la distribución de agua por los emisores asumiendo una tasa de descarga del emisor de forma continua; estos modelos generalmente resuelve las ecuaciones de flujo gobernantes, sin embargo solo pueden ser usados para simular el movimiento del agua de sistemas de riego por goteo con geometrías simplificadas (Subbaiah, 2013).

Finalmente, los modelos numéricos analizan los proceso de filtración, redistribución y drenaje utilizando el modelo de Richards (Richards, 1931) que expresa la variación del contenido de agua en el suelo en función del tiempo y la posición (Martinez et al., 2013). La alta no linealidad del modelo de Richards debido a la dependencia de la conductividad hidráulica y la difusividad en el contenido de agua dificultan su solución numérica (Chen et al., 2024; Soulis & Elmaloglou, 2016). En consecuencia se han propuesto diferentes métodos numéricos para aproximar el modelo de Richards como: diferencias finitas, elementos finitos, diferencias finitas integradas y métodos de elementos de contorno (Subbaiah, 2013).

El software HYDRUS 2D/3D es un modelo ampliamente utilizado que resuelve numéricamente mediante elementos finitos la ecuación de Richards y las ecuaciones de advección dispersión para simular el flujo de agua, calor y solutos en medio porosos de saturación variable con limites geométricos irregulares y textura heterogénea en dos dimensiones (Morianou et al., 2023; Šimůnek et al., 2012).

Los modelos basados en procesos y que han sido calibrados son una

herramienta importante en la investigación y el diseño de sistemas de riego porque permite predecir la distribución espacio temporal del agua en el suelo en la zona radicular y debajo de ella (S. et al., 2024).

2.3 Modelos de crecimiento de cultivos

Un modelo de crecimiento de cultivo puede definirse como una representación matemática de un cultivo particular que crece en un medio de cultivo (sustrato, suelo, agua) y clima específico (campo abierto o invernadero); en el modelo de cultivo el sistema que representa al cultivo es dividido en componentes como por ejemplo el cultivo, el suelo y el clima, y los procesos se caracterizan por ecuaciones matemáticas. (Marisa Gallardo et al., 2020).

Los modelos de crecimiento de cultivos, se han desarrollado como una herramienta que permite comprender como los factores del clima, suelo y las prácticas de manejo del cultivo y riego afectan la producción de alimentos, (Lopez-Jimenez et al., 2022). En este sentido, los modelos de crecimiento de cultivo proporcionan información que permite tomar decisiones con respecto al momento de siembra, la cantidad y frecuencia de riego, las dosis de fertilización, entre otras (Saqib & Akbar Anjum, 2021). En consecuencia, el modelo de crecimiento del cultivo apropiado en función de las condiciones de clima, suelo, cultivo y prácticas de manejo puede incrementar la eficiencia del uso de agua y nutrientes así como mejorar la calidad del producto y el rendimiento (Yu et al., 2024).

Se han desarrollado varios modelos matemáticos para aumentar el conocimiento sobre los sistemas de cultivo en invernadero. En concreto, se han propuesto varios modelos para el cultivo de tomates como TOMGRO (Jones et al., 1991), TOMSIM (Heuevelink, 1999), TOMPOUSSE (Abreu et al., 2000), VegSyst (Gallardo et al., 2014), Vanthoor (Vanthoor et al., 2011), entre otros.

El modelo TOMGRO fue diseñado para modelar el crecimiento de tomate y rendimiento de fruta en función de la variación de temperatura, radiación solar y concentración de CO₂ al interior del invernadero. La versión original del modelo

TOMGRO contiene 69 variables de estado en función del desarrollo del cultivo como: número de hojas, tallos, frutos, biomasa en las hojas, peciolo, y área de las hojas; en su versión simplificada el modelo TOMGRO mantiene solo cinco variables de estado, número de nodos, índice de área foliar, materia seca de frutos, acumulación de biomasa, acumulación de biomasa de frutos maduros.(Jones et al., 1991; Jones et al., 1999).

El modelo TOMSIM, modelo mecanicista de crecimiento de tomate en invernadero, contiene múltiples submodelos cada uno relacionado con diferentes aspectos del desarrollo del cultivo como la fotosíntesis, la producción de materia seca, la tasa de aparición de racimos, el periodo de crecimiento del fruto, la partición de la materia así como la transmisividad del invernadero (Gong et al., 2022; Heuvelink, 1999). El modelo TOMSIM al igual que TOMGRO incluye el efecto de radiación solar, la concentración de CO₂ y la temperatura en el crecimiento y producción del tomate, además de prácticas de manejo como la densidad de población y la poda de frutos (López-Cruz et al., 2005).

TOPOUSSE es un modelo simple que estima la producción semanal de tomate en invernadero en termino de número de frutos y peso fresco de los frutos cosechados; los datos de entrada del modelo son la temperatura promedio semanal del invernadero, la integral semanal de la radiación global externa, la transmitancia promedio del invernadero, la densidad de tallos, el número de frutos por racimo y la semana de floración del primer racimo (Abreu et al., 2000). TOMPOUSSE simula la producción de biomasa mediante el enfoque de eficiencia en el uso de la radiación (RUE) y la partición de la materia seca de frutos (Abreu et al., 2000; López-Cruz et al., 2005).

La complejidad de los modelos de crecimiento TOMGRO y TOMSIM mejora la precisión de las simulaciones, sin embargo se reduce la probabilidad de adopción debido a la dificultad de obtener la información necesaria para el estado inicial del sistema y las variables de entrada de los modelos, además, para garantizar la precisión de la simulación se requiere de la calibración y validación de los modelos para las condiciones en las que se establece el cultivo (Abreu et al.,

2000; Gallardo et al., 2020).

Para solventar la dificultades de los modelos mencionados anteriormente, se desarrollaron los modelos VegSyst (Gallardo et al., 2011) y HortSyst (Martinez-Ruiz et al., 2019), estos además de modelar el crecimiento y producción del cultivo de tomate, ayudan en la toma de decisión para la aplicación de nitrógeno y necesidades de riego.

VegSyst es un modelo de crecimiento de cultivo relativamente simple, el modelo supone que el cultivo no tiene límites de agua o nutrientes; las variables de entrada del modelo son datos diarios de temperatura máxima y mínima diaria, humedad relativa máxima y mínima, la integral de la radiación solar, además de la latitud donde se estable el cultivo (Gallardo et al., 2011). VegSyst simula la producción diaria de biomasa del cultivo, la absorción de nitrógeno y la evapotranspiración del cultivo (ETc) a partir del tiempo térmico, por lo cual puede adaptarse a variaciones de clima dentro del invernadero, diferentes fechas de siembra y diferentes diseños del invernadero. (Gallardo et al., 2014).

Martinez-Ruiz et al. (2019) desarrollaron el modelo HortSyst que permite ajustar programas de nutrición y riego en sistemas hidropónicos de producción de tomate en invernadero. HortSyst predice la producción total de materia seca, la absorción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, índice de área foliar y la transpiración del cultivo, en base a mediciones horarias de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar global (Martinez-Ruiz, Pineda-Pineda, et al., 2020; Martinez-Ruiz, Sánchez-García, et al., 2020).

2.4 Literatura citada

- Abreu, P., Meneses, J. F., & Gary, C. (2000). Tompousse, a model of yield prediction for tomato crops: Calibration study for unheated plastic greenhouses. *Acta Horticulturae*, 519, 141–149. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2000.519.14>
- Bajpai, A., & Kaushal, A. (2020). Soil moisture distribution under trickle irrigation: a review. *Water Supply*, 20(3), 761–772. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.005>

- Chen, L.-J., Feng, Q., Li, F.-R., & Li, C.-S. (2014). A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water. *Agricultural Water Management*, 146(December), 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.021>
- Chen, Y., Zheng, H., Huang, X., & Liu, S. (2024). Modeling variably saturated flows in porous media using the numerical manifold method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 169(PB), 106016. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.106016>
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water*, 14(11), 1827. <https://doi.org/10.3390/w14111827>
- de Oliveira, M. P. G., Zorzeto-Cesar, T. Q., Nóia Júnior, R. de S., Wallach, D., Asseng, S., & Rodrigues, L. H. A. (2024). Uncertainty in greenhouse tomato growth models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225(February), 109324. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109324>
- Gallardo, M., Giménez, C., Martínez-Gaitán, C., Stöckle, C. O., Thompson, R. B., & Granados, M. R. (2011). Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 101(1), 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.09.008>
- Gallardo, M., Thompson, R. B., Giménez, C., Padilla, F. M., & Stöckle, C. O. (2014). Prototype decision support system based on the VegSyst simulation model to calculate crop N and water requirements for tomato under plastic cover. *Irrigation Science*, 32(3), 237–253. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0427-3>
- Gallardo, Marisa, Elia, A., & Thompson, R. B. (2020). Decision support systems and models for aiding irrigation and nutrient management of vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 240(October), 106209. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106209>
- Gong, L., Yu, M., Cutsuridis, V., Kollias, S., & Pearson, S. (2022). A Novel Model Fusion Approach for Greenhouse Crop Yield Prediction. *Horticulturae*, 9(1), 5. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9010005>
- Heuevelink, E. (1999). Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development. *Annals of Botany*, 83(4), 413–422. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0832>
- Incrocci, L., Thompson, R. B., Fernandez-Fernandez, M. D., De Pascale, S., Pardossi, A., Stanghellini, C., Roupheal, Y., & Gallardo, M. (2020).

- Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 242, 106393. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106393>
- J. W. Jones, E. Dayan, L. H. Allen, H. Van Keulen, & H. Challa. (1991). A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE*, 34(2), 0663–0672. <https://doi.org/10.13031/2013.31715>
- Jones, J. W., Kenig, A., & Vallejos, C. E. (1999). Reduced state-variable tomato growth model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 42(1), 255–265. <https://doi.org/10.13031/2013.13203>
- Juárez-Maldonado, A., De Alba Romenus, K., Zermeño González, A., & Benavides Mendoza, A. (2017). Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 943–954. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i5.589>
- Karimi, B., Mohammadi, P., Sanikhani, H., Salih, S. Q., & Yaseen, Z. M. (2020). Modeling wetted areas of moisture bulb for drip irrigation systems: An enhanced empirical model and artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178(September), 105767. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105767>
- Katsoulas, N., & Stanghellini, C. (2019). Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy*, 9(7), 392. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070392>
- López-Cruz, I. L., Ramírez-Arias, A., & Rojano-Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(2), 257–267. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60911211>
- Lopez-Jimenez, J., Vande Wouwer, A., & Quijano, N. (2022). Dynamic Modeling of Crop–Soil Systems to Design Monitoring and Automatic Irrigation Processes: A Review with Worked Examples. *Water*, 14(6), 889. <https://doi.org/10.3390/w14060889>
- Martinez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., & Prado-Hernández, J. V. (2019). HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(1), 89–102. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000100089>
- Martinez-Ruiz, A., Pineda-Pineda, J., Ruiz-García, A., Prado-Hernández, J. V., López-Cruz, I. L., & Mendoza-Perez, C. (2020). The HORTSYST model extended to phosphorus uptake prediction for tomatoes in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 1271(1271), 301–306.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1271.41>

- Martinez-Ruiz, A., Sánchez-García, P., Pineda-Pineda, J., Prado-Hernández, J. V., & Ruiz-García, A. (2020). Prediction of nitrogen, phosphorus and potassium uptake using a photothermal model. *Acta Horticulturae*, 1296(1296), 469–476. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.61>
- Martinez, J. L., Schvezov, C. E., & Rosenberg, M. R. (2013). Aproximación en diferencias finitas a la ecuación de richards para transporte de agua en suelos no saturados. *Mecánica Computacional*, XXXII(33), 2779–2793. <http://hdl.handle.net/11336/9299>
- Morianou, G., Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2023). A Review of HYDRUS 2D/3D Applications for Simulations of Water Dynamics, Root Uptake and Solute Transport in Tree Crops under Drip Irrigation. *Water*, 15(4), 741. <https://doi.org/10.3390/w15040741>
- Richards, L. A. (1931). CAPILLARY CONDUCTION OF LIQUIDS THROUGH POROUS MEDIUMS. *Physics*, 1(5), 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Romero, P. J., Razuri, R. L., Peña, C., & Romero, E. (2015). Distribución de cationes en el bulbo humedo del fertirriego en el cultivo de pimentón (*Capsicum annuum* L .) Con cintas de goteo. *Conocimiento Libre y Licenciamiento*, 6(9), 120–131.
- S., M. N., N. K., S., Ga, D., S., P., & N., V. (2024). Coupled weather and crop simulation modeling for smart irrigation planning: a review. *Water Supply*, 24(8), 2844–2865. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.170>
- Saqib, M., & Akbar Anjum, M. (2021). Applications of Decision Support System: A Case Study of Solanaceous Vegetables. *Phyton*, 90(2), 331–352. <https://doi.org/10.32604/phyton.2021.011685>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M. H., & Karimi, S. (2020). Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, 585(January), 124792. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124792>
- Šimůnek, J., van Genuchten, M., & Šejna, M. (2012). *The HYDRUS Software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Technical*

manual, Version 2.0. (p. 258). Pc Progress.

- Skaggs, T. H., Trout, T. J., & Rothfuss, Y. (2010). Drip Irrigation Water Distribution Patterns: Effects of Emitter Rate, Pulsing, and Antecedent Water. *Soil Science Society of America Journal*, 74(6), 1886–1896. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0341>
- Soulis, K. X., & Elmaloglou, S. (2016). Optimum Soil Water Content Sensors Placement in Drip Irrigation Scheduling Systems: Concept of Time Stable Representative Positions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(11), 4016054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001093](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001093)
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31(3), 225–258. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0309-x>
- Sun, L., Li, B., Yao, M., Mao, L., Zhao, M., Niu, H., Xu, Z., Wang, T., & Wang, J. (2023). Simulation of Soil Water Movement and Root Uptake under Mulched Drip Irrigation of Greenhouse Tomatoes. *Water*, 15(7), 1282. <https://doi.org/10.3390/w15071282>
- Vanthoor, B. H. E., de Visser, P. H. B., Stanghellini, C., & van Henten, E. J. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 2, description and validation of a tomato yield model. *Biosystems Engineering*, 110(4), 378–395. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.005>
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M. H., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S. D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., ... Young, I. M. (2016). Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15(5), 1–57. <https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>
- Yu, X., Luo, Y., Bai, B., Chen, X., Lu, C., & Peng, X. (2024). Prediction Model of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizer Application Rate for Greenhouse Tomatoes under Different Soil Fertility Conditions. *Agronomy*, 14(6), 1165. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061165>
- Zhang, J., Xiang, L., Zhu, C., Li, W., Jing, D., Zhang, L., Liu, Y., Li, T., & Li, J. (2023). Evaluating the irrigation schedules of greenhouse tomato by simulating soil water balance under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 283(February), 108323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108323>

3 HYDRUS 2D COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL

Victor Hugo Meneses Ramirez^a, Jorge Víctor Prado Hernández^{*b}, Irouri Cristóbal Muñoz^a, Ramón Alejandro Ortiz Villavicencio^a, Fermín Pascual Ramírez^c

^aPosgrado de ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, C.P. 56230, Texcoco, Estado de México, México.

^bDepartamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, C.P. 56230, Texcoco, Estado de México, México.

^cUniversidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Exhacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán, C.P.58190

*Autor para correspondencia: jpradoh@chapingo.mx

3.1 Resumen

Para validar el software HYDRUS 2D como una herramienta de apoyo para el diseño y operación de sistemas de riego por goteo superficial, se usaron valores observados del contenido volumétrico de agua en un suelo de textura arcillosa. Para las observaciones se usó un modelo físico experimental, en el que se instalaron nueve sensores de humedad en un arreglo de 10 x 10 cm debajo del emisor. El riego se aplicó con un emisor instalado superficialmente, con cuatro caudales, dos tiempos de riego y dos contenidos iniciales de agua en el suelo por cada caudal. Los parámetros estadísticos muestran que las predicciones del contenido volumétrico de agua en el suelo con el modelo generado en HYDRUS 2D concuerdan con las mediciones obtenidas en el modelo físico experimental. Esto respalda el uso de HYDRUS 2D como herramienta de apoyo para el diseño y operación de sistemas de riego por goteo superficial.

Palabras clave: Riego por goteo, HYDRUS 2D, modelación matemática, agua en el suelo, patrón de humedecimiento.

Tesis de Doctorado en ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Victor Hugo Meneses Ramirez

Director de Tesis: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

3.2 Abstract

Observed values of the volumetric water content in a clay-textures soil were used to validate the HYDRUS 2D software as a support tool for the design and operation of surface drip irrigation systems. An experimental physical model was used for the observations in which nine soil moisture sensors were installed in a 10X10 cm below the emitter. The Irrigation was applied with a superficially installed emitter, with four flows, two irrigation times and two initial soil water contents for each flow. The statistical parameters show the predictions of the volumetric water content on the soil with the model generated in HYDRUS 2D go according with the measurements obtained in the experimental physical model. This supports the use of Hydrus 2D as a support tool for the design and operation of surface drip irrigation systems.

Keywords: drip irrigation; HYDRUS 2D; mathematical modelling; soil water; soil wetting pattern.

3.3 Introducción

El crecimiento mundial de la población, el cambio climático, la competencia de otros sectores por el uso del agua, la contaminación de cuerpos de agua y demás factores hacen que el recurso hídrico para su uso en la agricultura se torne cada vez más limitado (W. Li et al., 2020). Es conveniente para los cultivos, pero también para la protección del medio ambiente que el riego se aplique con la mayor eficiencia posible. En este sentido, el uso de sistemas de riego de precisión, debidamente diseñados y operados, toman un rol preponderante en la aplicación oportuna del agua y en la cantidad apropiada, gracias a una selección adecuada del caudal de los emisores, a un marco de instalación de los emisores apropiado y a un cálculo apropiado del tiempo de riego (Cristóbal-Muñoz et al., 2022; Domínguez-Niño et al., 2020; Reyes-Esteves & Slack, 2019b) mejorando así la eficiencia en el uso del agua.

En los sistemas de riego por goteo la aplicación del agua, el movimiento y la distribución espacial de la humedad y en consecuencia de las raíces, se encuentra limitado a un pequeño volumen de suelo ubicado directamente debajo del emisor (Romero et al., 2015). Sin embargo, cuando el agua de riego es aplicada en pequeñas cantidades, esta permanece en la parte superficial del suelo, resultando así un transporte de agua insuficiente a una mayor profundidad.

A medida que se incrementa la cantidad de agua aplicada, la región húmeda del suelo aumenta tanto horizontal como verticalmente; es por ello, que se debe garantizar que la cantidad de agua aplicada sea suficiente para que el volumen de mojado coincida con el patrón de enraizamiento del cultivo lo más cercano posible (Chen et al., 2014). Para lograr esto, se requiere de un buen entendimiento de las propiedades hidráulicas del suelo involucradas en el proceso de infiltración, además de factores como la absorción de agua de los cultivos, patrones de distribución de raíces, tasas de descarga de emisores, frecuencia y tiempo de riego y otros factores que pueden influir en la distribución espacial del contenido volumétrico de agua en el suelo ($\theta\theta$) (Mubarak et al., 2009).

La distribución del agua en el suelo puede ser determinada experimentalmente, pero resulta laborioso y costoso, además de ser específico para cada caso, o se puede simular con modelos matemáticos como la ecuación de Richards que se resuelve en su versión simplificada mediante métodos analíticos, o más frecuentemente mediante métodos numéricos (Soulis & Elmaloglou, 2016). HYDRUS 2D es un software que resuelve numéricamente la ecuación de Richards y las ecuaciones de advección-dispersión para simular el flujo de agua, calor y solutos en medios porosos de saturación variable con límites geométricos irregulares y textura heterogénea en dos dimensiones (J Šimůnek, van Genuchten, & Šejna, 2012). HYDRUS 2D ha sido usado para simular aspectos de diseño y operación del riego por goteo, tales como: la influencia de la textura y contenido inicial del agua en el suelo ($\theta\theta_i$), la tasa de aplicación y tiempo de riego, técnicas de aplicación del riego (continuo o pulsos), separación entre emisores y laterales de riego, geometría del patrón de humedecimiento alrededor de un emisor en riego por goteo subsuperficial (Bufon et al., 2012; Cote et al., 2003; Elmaloglou et al., 2013; Yan-wei Fan et al., 2024; Provenzano, 2007; Reyes-Esteves & Slack, 2019a) o debajo de un emisor en riego por goteo superficial (Dabach et al., 2013; Kandelous & Šimůnek, 2010; Kwon et al., 2020; Yuchen Li et al., 2023; Naglič et al., 2014; Skaggs et al., 2004, 2010). A pesar de que HYDRUS 2D ha sido evaluado por muchos investigadores, tanto en pruebas de campo como en laboratorio en contenedores de suelo, la mayoría de los

trabajos se centran en analizar las dimensiones horizontales y verticales del patrón de humedecimiento debajo o alrededor de un emisor y son pocos los que estudiaron la distribución del contenido del agua.

Para una representación correcta de la geometría del patrón de humedecimiento y de su contenido de agua con HYDRUS 2D, los investigadores coinciden que se requiere una adecuada caracterización del suelo. Los parámetros hidráulicos del suelo son requeridos como variables de entrada para las simulaciones, los cuales pueden ser obtenidos por diferentes medios, tales como: mediciones directas en campo, funciones de pedotransferencia o mediante modelación inversa (Domínguez-Niño et al., 2020; Ventrella et al., 2019). Las alternativas de obtención de la información, pueden generar diferencias en los valores de los parámetros hidráulicos del suelo (Arbat et al., 2005). Sin embargo, en la mayoría de los estudios se utilizaron los valores obtenidos con las funciones de pedotransferencia de Rosetta (Schaap et al., 2001) (Bufon et al., 2012; Egea et al., 2024; García Morillo et al., 2017; Sun et al., 2023; Zhang et al., 2023) y los sugeridos por Carsel & Parrish (1988), ambos incluidos en HYDRUS 2D (Dabach et al., 2013; Yanwei Fan et al., 2019; Yuchen Li et al., 2023; Reyes-Esteves & Slack, 2019a), y en pocos casos donde los parámetros de Rosetta no fueron representativos, se realizó la calibración de los parámetros mediante diferentes estrategias como: simulación inversa, comparación de valores observados y predichos y comparación de diferentes conjuntos de valores de parámetros (Chen et al., 2020; Khashaei et al., 2023; Ventrella et al., 2019).

La comprensión del movimiento del agua en el suelo es la base para el diseño y operación de sistemas de riego; sin embargo, aún hay poca disponibilidad de información basada en criterios agronómicos que permita determinar el arreglo de instalación de los emisores y la duración de los riegos para diferentes caudales y texturas de suelo para obtener una mejor distribución de la humedad dentro del patrón de humedecimiento en riego por goteo superficial. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la capacidad de HYDRUS 2D para predecir el contenido de agua en el suelo ($\theta\theta$) durante un riego por goteo

superficial bajo diferentes condiciones de contenido inicial de agua en el suelo ($\theta\theta_i$), tiempo de riego y tasa de aplicación de riego, variables que condicionan el diseño y operación de sistemas de riego por goteo superficial en campo. Con la finalidad de contar con una referencia de la forma de obtención de la información del suelo a usar en las modelaciones futuras, se discute la precisión de los resultados de las simulaciones obtenidas con los valores de parámetros hidráulicos del suelo obtenidos mediante funciones de pedotransferencia de Rosetta y los obtenidos con simulación inversa, así como la influencia de dos estrategias de representación de $\theta\theta_i$ en el dominio computacional de flujo del modelo generado en HYDRUS 2D sobre la predicción de la dinámica espacio temporal de $\theta\theta$.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Modelo físico experimental

Las mediciones del comportamiento espacio-temporal del contenido de agua en el suelo se hicieron en un modelo físico experimental, este consiste en un contenedor de suelo construido con placas de acrílico cristal de 6.0 mm de espesor, montadas en una estructura de aluminio con dimensiones internas de 100 cm x 100 cm x 95 cm. Se hizo un sistema de drenaje en el fondo del contenedor, compuesto de 16 perforaciones de 8.0 mm de diámetro orientadas simétricamente en cuatro filas y cuatro columnas (Figura 3.1A). El contenedor fue llenado hasta los 80 cm con capas de 5.0 cm de suelo y apisonadas para obtener una densidad aparente de 1.3 g cm^{-3} . Debajo del emisor se instalaron diez sensores de humedad de suelo marca HOBO modelo S-SMC-M005 ® con una precisión de $\pm 0.031 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, en un arreglo rectangular de 10 cm x 10 cm. Para el registro de la información se utilizó un equipo U30 USB Weather Station Data Logger® marca HOBO con capacidad de conexión de 10 sensores. El riego se aplicó con goteros de botón, instalados sobre la superficie del suelo a una distancia de 8.0 cm de una las paredes verticales del contenedor (Figura 3.1B).

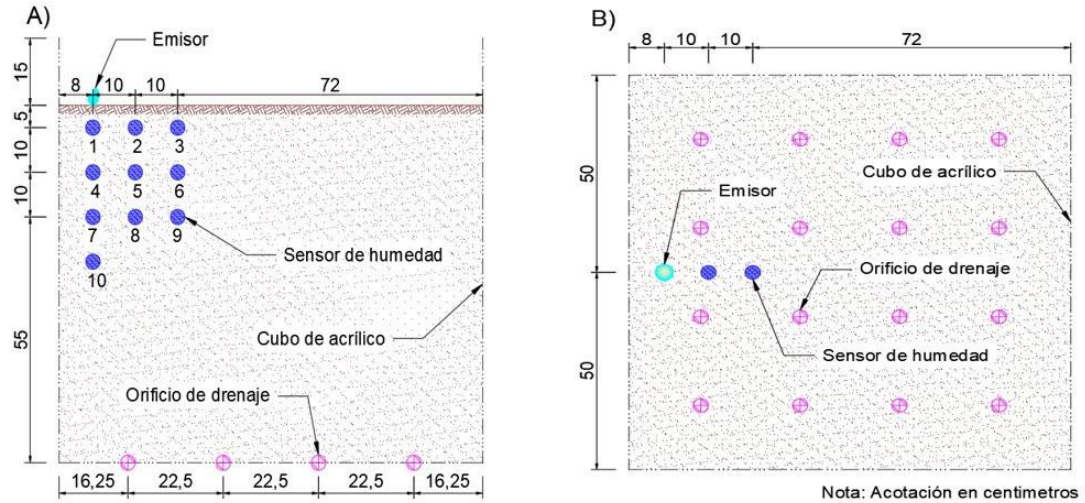


Figura 3.1. Modelo físico experimental. A) Vista lateral. B) Vista en planta.

El suelo del contenedor tenía una textura arcillosa (arena = 24.6%, arcilla = 42.1%, limo = 33.3%), según la clasificación del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), con una densidad aparente de 1.3 g cm^{-3} , contenido de materia orgánica de 2.2%, contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ($\theta\theta_{CC}$) de $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente ($\theta\theta_{PMP}$) de $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Los métodos empleados para determinar la textura, densidad aparente, contenido de materia orgánica, $\theta\theta_{CC}$ y $\theta\theta_{PMP}$, fueron respectivamente: hidrómetro de Bouyoucos, terrón y parafina, Walkley y Black, olla y membrana de presión.

3.4.2 Pruebas de riego

Con la finalidad de estudiar la influencia de la tasa de aplicación del agua, tiempo de riego y del contenido inicial de agua en el suelo ($\theta\theta_i$), se evaluaron ocho pruebas de riego, resultado de aplicar cuatro valores de caudal y dos contenidos iniciales de agua en el suelo por cada caudal (Cuadro 3.1 y Cuadro 3.2). Los caudales aplicados en las pruebas de riego corresponden a caudales comerciales utilizados comúnmente en diferentes cultivos de México, y los $\theta\theta_i$ usadas fueron valores que se encuentran entre $\theta\theta_{PMP}$ y $\theta\theta_{CC}$, una de ellas próxima a $\theta\theta_{PMP}$ y otra próxima a $\theta\theta_{CC}$, puesto que en condiciones de campo es común tener

humedades en el suelo pequeñas previas a la siembra y humedades próximas a θ_{cc} después de aplicar el primer riego. Los tiempos de riego para cada una de las pruebas fueron propuestos en función de la θ_i ; para las pruebas con el mismo caudal, se aplicó más tiempo de riego para la condición de θ_i menor.

Cuadro 3.1. Pruebas de riego realizadas en el modelo físico experimental.

Riego	Caudal de emisor (L h ⁻¹)	Tiempo de riego (min)
R1	1.5	600
R2	1.5	390
R3	3.2	150
R4	3.2	120
R5	4.1	84
R6	4.1	90
R7	7.9	60
R8	7.9	90

3.4.3 Modelo matemático

Para modelar la dinámica del agua en el suelo se utilizó el software HYDRUS 2D (Jirí Šimůnek et al., 2008) que resuelve numéricamente la ecuación bidimensional de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + K(h) \quad (3.1)$$

Donde θ es el contenido de agua en el suelo (cm³ cm⁻³), t es el tiempo (min), x es la coordenada horizontal (cm), $K(h)$ es la conductividad hidráulica (cm min⁻¹), 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 (Mualem, 1976; Genuchten V M, 1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|^n)^m} \quad (3.2)$$

$$K(h) = K_s \left[\frac{S_e}{S_s} \right]^l - (1 - S_e^{1/m})^m \quad (3.3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.4)$$

Donde θ_s es el contenido de agua en el suelo a saturación ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r es el contenido residual de agua en el suelo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); K_s es la conductividad hidráulica a saturación (cm min^{-1}); S_e es el grado efectivo de saturación ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); a , n y l son parámetros de ajuste, donde a está relacionado con el inverso de la presión de entrada de aire (1 cm^{-1}), n con la distribución de tamaño de poros (-), l con la tortuosidad, también conocida como conectividad de poros (-), y $m = 1 - 1/n$.

Condiciones iniciales y de frontera

Para optimizar el cálculo, el dominio de flujo computacional se redujo respecto al modelo físico experimental. El inicio del eje horizontal en el dominio de flujo corresponde a la ubicación del emisor en el modelo físico experimental y su longitud se estableció en función del diámetro máximo observado en los patrones de humedecimiento de las pruebas de riego; de modo que las simulaciones en HYDRUS 2D fueron hechas usando un dominio computacional de flujo rectangular de 40 cm en el eje horizontal y 80 cm de profundidad (Figura 3.2A y 3.2B). Un mallado de elementos triangulares fue generado automáticamente para discretizar el dominio de flujo con un total de 2,911 nodos y 5,628 elementos. Los elementos triangulares tuvieron lados de 0.5 cm, alrededor del emisor, y su tamaño incrementó hasta 2.0 cm en las otras esquinas del dominio computacional.

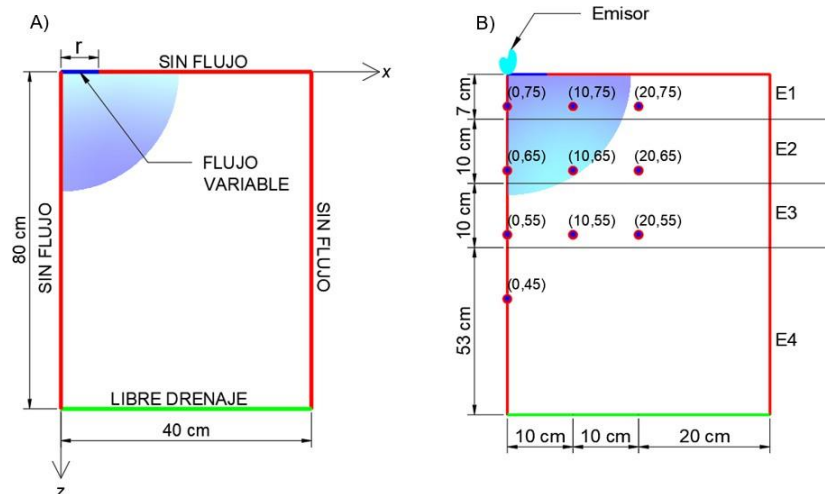


Figura 3.2. A) Dominio computacional de flujo y condiciones de frontera. B) Ubicación de sensores en el dominio de flujo y estratos de suelo definidos para la simulación en HYDRUS 2D. Los valores entre paréntesis indican la distancia horizontal al emisor y la altura de los puntos de monitoreo de la humedad en el suelo ($\theta\theta$).

Las condiciones de frontera fueron de ausencia de flujo en las fronteras laterales del dominio y libre drenaje en la frontera inferior. Dado que el modelo físico experimental se instaló en un lugar cerrado, libre de radiación solar directa, nula presencia de corrientes de aire y donde la evaporación del agua en la superficie del suelo era prácticamente nula, en gran parte de la frontera superior se consideró una condición de ausencia de flujo. Para representar la influencia del emisor en la frontera superior se consideró una condición de flujo variable en el tiempo, en la que la tasa de aplicación del emisor durante el periodo de riego se obtuvo según Elnesr & Alazba (2019):

$$F = \frac{q}{\pi r^2} \quad (3.5)$$

Donde F es tasa de flujo aplicado por el emisor (cm día^{-1}); q es el caudal del emisor ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$); y r es el radio de infiltración en la superficie del suelo (cm).

Con la finalidad de simplificar la toma de información y los cálculos computacionales en investigaciones futuras, se analizó la capacidad predictiva de HYDRUS 2D en las ocho pruebas de riego con dos estrategias de

representación del contenido inicial de agua del suelo ($\theta\theta_i$) en el dominio de flujo computacional. La primera estrategia consideró una representación del $\theta\theta_i$ uniforme en todo el dominio (EST1) el cual se obtuvo promediando los valores registrados por los sensores previo a cada riego. La segunda estrategia consideró un $\theta\theta_i$ uniforme horizontalmente en cada uno de los cuatro estratos horizontales (E1, E2, E3 y E4) en que se dividió el dominio computacional, y variable linealmente con la profundidad del dominio (EST2) (Figura 3.2A). La humedad inicial para los estratos E1, E2 y E3 se obtuvo promediando los valores registrados por los tres sensores instalados a la misma profundidad. La humedad inicial del estrato E4 se tomó de un solo sensor instalado en las coordenadas (0,45) (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Contenido inicial de agua en el suelo ($\theta\theta_i$) en las estrategias de representación uniforme (EST1) y por estratos (EST2) de las pruebas de riego realizadas en el modelo físico experimental.

Riego	$\theta\theta_i$ (cm ³ cm ⁻³)				
	EST1	EST2			
	(0 – 80 cm)	Estrato 1 (0 – 7 cm)	Estrato 2 (7 – 17 cm)	Estrato 3 (17 -27 cm)	Estrato 4 (27 -80 cm)
R1	0.050	0.062	0.050	0.039	0.042
R2	0.216	0.243	0.243	0.161	0.052
R3	0.226	0.229	0.245	0.205	0.092
R4	0.252	0.268	0.266	0.222	0.103
R5	0.214	0.158	0.261	0.222	0.229
R6	0.250	0.270	0.261	0.220	0.226
R7	0.242	0.252	0.256	0.218	0.226
R8	0.187	0.106	0.245	0.210	0.218

Estimación de parámetros hidráulicos del suelo

Cuando no se cuenta con los parámetros hidráulicos del suelo, es posible obtenerlos de diferentes maneras, ya sea mediante valores reportados en diferentes investigaciones, con los valores reportados por Carsel & Parrish (1988)

o mediante funciones de pedotransferencia como las de Rosetta (Schaap et al., 2001), estas dos últimas alternativas se incluyen en HYDRUS 2D. Se analizó la capacidad predictiva del comportamiento del contenido de agua en el suelo con los valores de los parámetros hidráulicos del suelo $\theta\theta_s$, $\theta\theta_r$, K_s , a , n y l , obtenidos mediante las cinco funciones de pedotransferencia de Rosetta (Cuadro 3.3), tomando como base la prueba de riego R3 en ambas estrategias de representación de $\theta\theta_i$ (EST1y EST2). El conjunto C1 de parámetros se obtuvo según la clase textural del suelo (arcilla); el conjunto C2 se obtuvo con los porcentajes de arena (24.6%) limo (33.3%) y arcilla (42.1%); el conjunto C3 se obtuvo con la información del conjunto C2 y la densidad aparente (1.3 g cm^{-3}); el conjunto C4 considera la información del C3 y el contenido de agua en el suelo a 33 kPa ($0.31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); y el conjunto C5 considera la información del C4 y el contenido de agua en el suelo a 1500 kPa ($0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Posteriormente, con el conjunto de valores de los parámetros hidráulicos que mostraron un desempeño mejor en la modelación, se simularon las otras siete pruebas de riego con las dos estrategias de representación de $\theta\theta_i$ (EST1y EST2) del Cuadro 3.2. En seguida se evaluó el desempeño de la simulación de los ocho riegos para decidir si hacer o no hacer la modelación inversa para ajustar los parámetros hidráulicos que minimizaran los errores entre los valores observados y simulados.

Cuadro 3.3. Conjuntos de valores de los parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con diferentes funciones de pedotransferencia de Rosetta.

Conjunto	$\theta\theta_r$ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	$\theta\theta_s$ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	a (1 cm^{-1})	n	K_s (cm min^{-1})	l
C1	0.0680	0.3800	0.0080	1.0900	0.00333000	0.5
C2	0.0905	0.4613	0.0146	1.3346	0.00640278	0.5
C3	0.0949	0.4860	0.0142	1.3825	0.01296528	0.5
C4	0.0861	0.4715	0.0198	1.3309	0.01932000	0.5
C5	0.0759	0.4714	0.0178	1.3071	0.01950000	0.5

3.4.4 Evaluación del desempeño del modelo

Para juzgar el desempeño del modelo se utilizó el coeficiente de determinación

(r^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Los parámetros r^2 , RMSE y NSE fueron calculados usando las siguientes ecuaciones (N. Moriasi et al., 2007):

$$r^2 = \frac{(N \sum_{i=1}^N S_i O_i - \sum_{i=1}^N S_i \sum_{i=1}^N O_i)^2}{(N \sum_{i=1}^N (S_i)^2 - (\sum_{i=1}^N S_i)^2)(N \sum_{i=1}^N (O_i)^2 - (\sum_{i=1}^N O_i)^2)} \quad (3.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (3.7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i)^2} \quad (3.8)$$

Donde O_i y S_i son los i -ésimos valores de humedad en el suelo observados experimentalmente y simulados con HYDRUS 2D, respectivamente, y N es el número total de datos.

Para valorar el desempeño de la modelación, según los valores de NSE, se usó el criterio de Ritter & Muñoz-Carpena, (2013), quienes sugieren: insatisfactorio ($NSE < 0.65$), aceptable ($0.65 \leq NSE < 0.80$), bueno ($0.80 \leq NSE < 0.90$) y excelente ($NSE \geq 0.90$).

3.5 Resultados

3.5.1 Con valores de los parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con Rosetta

Cuatro y tres de los cinco conjuntos de valores de los parámetros $\theta\theta_s$, $\theta\theta_r$, K_s , a , n y l (Cuadro 3.3), produjeron convergencia en la modelación espacio-temporal del contenido de agua en el suelo de la prueba de riego R3 en las estrategias de representación del contenido inicial de agua en el suelo EST1 y EST2, respectivamente; los valores del coeficiente de determinación (r^2) y RMSE resultaron similares en ambas estrategias, ligeramente mayor el r^2 en la EST2 (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Desempeño de la modelación de la prueba de riego R3 con cinco conjuntos de valores de parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con funciones de pedotransferencia de Rosetta.

Estrategia de representación de la humedad inicial $\theta\theta_i$	Conjunto de valores de los parámetros hidráulicos	r^2	RMSE ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	NSE	*Desempeño
EST1: $\theta\theta_i$ uniforme	C1	NC	NC	NC	INP
	C2	0.71	0.056	0.595	INS
	C3	0.72	0.057	0.569	INS
	C4	0.71	0.056	0.587	INS
	C5	0.71	0.056	0.590	INS
EST2: $\theta\theta_i$ por estrato	C1	NC	NC	NC	INP
	C2	0.74	0.056	0.595	INS
	C3	NC	NC	NC	INP
	C4	0.74	0.056	0.589	INS
	C5	0.74	0.057	0.579	INS

* Desempeño según Ritter & Muñoz-Carpena (2013); INP: Inapropiado; INS: Insatisfactorio; NC: No converge.

Puesto que el desempeño de la modelación fue insatisfactorio, según Ritter & Muñoz-Carpena (2013), hubo la necesidad de optimizar los parámetros hidráulicos del suelo mediante modelación inversa.

3.5.2 Optimización de los parámetros hidráulicos del suelo

En la optimización de los parámetros hidráulicos del suelo (Cuadro 3.5), se tomaron como valores iniciales los de los conjuntos C3 y C5 para las estrategias EST1 y EST2, respectivamente, puesto que mostraron los mejores desempeños en las modelaciones según la RMSE. En la estrategia EST1 el conjunto de valores C3 arrojó un r^2 ligeramente mayor que el resto de conjuntos de valores y en la estrategia EST2 no hubo diferencias en los conjuntos en que hubo convergencia; sin embargo, en este segundo caso se decidió usar el conjunto de valores C5 pues según Skaggs et al. (2004) producen mejores modelaciones.

Cuadro 3.5. Valores de los parámetros de la ecuación de van Genuchten-Mualem, obtenidos con simulación inversa y utilizados en las simulaciones de las ocho pruebas de riego para las dos estrategias de representación de $\theta\theta_i$ (EST1 y EST2).

Parámetro de la ecuación	$\theta\theta_i$ uniforme (EST1)	$\theta\theta_i$ por estratos (EST2)
$\theta\theta_r$ (cm ³ cm ⁻³)	0.1000	0.0440
$\theta\theta_s$ (cm ³ cm ⁻³)	0.4500	0.4500
a (1 cm ⁻¹)	0.0050	0.0050
n	1.4800	1.4800
K_s (cm min ⁻¹)	0.0218	0.0182
l	0.5000	0.5000

3.5.3 Modelación con las dos estrategias de representación del contenido inicial de agua en el suelo

El comportamiento de los contenidos de agua en el suelo simulados mostraron la misma tendencia que los observados durante el tiempo de aplicación del riego en tres sitios de comparación, en ambas estrategias de representación del contenido inicial de agua en el suelo (Figura 3.3). En ambas estrategias, el desempeño de las predicciones va de aceptable a excelente, con mayores casos de excelencia en la estrategia EST2 (Cuadro 3.6). En la estrategia EST1, el valor de r^2 se encuentra entre 0.909 en el riego R8 y 0.996 en el riego R1. El valor de RMSE oscila entre 0.084 cm³ cm⁻³ en el riego R2 y 0.01 cm³ cm⁻³ en el riego R1. De acuerdo con el NSE el desempeño del modelo incrementa de aceptable a excelente. En la estrategia EST2 el valor de r^2 varía de 0.829 en el riego R8 a 0.996 en el riego R1, y el valor de RMSE varía de 0.014 cm³ cm⁻³ en el riego R1 a 0.043 cm³ cm⁻³ en el riego R8.

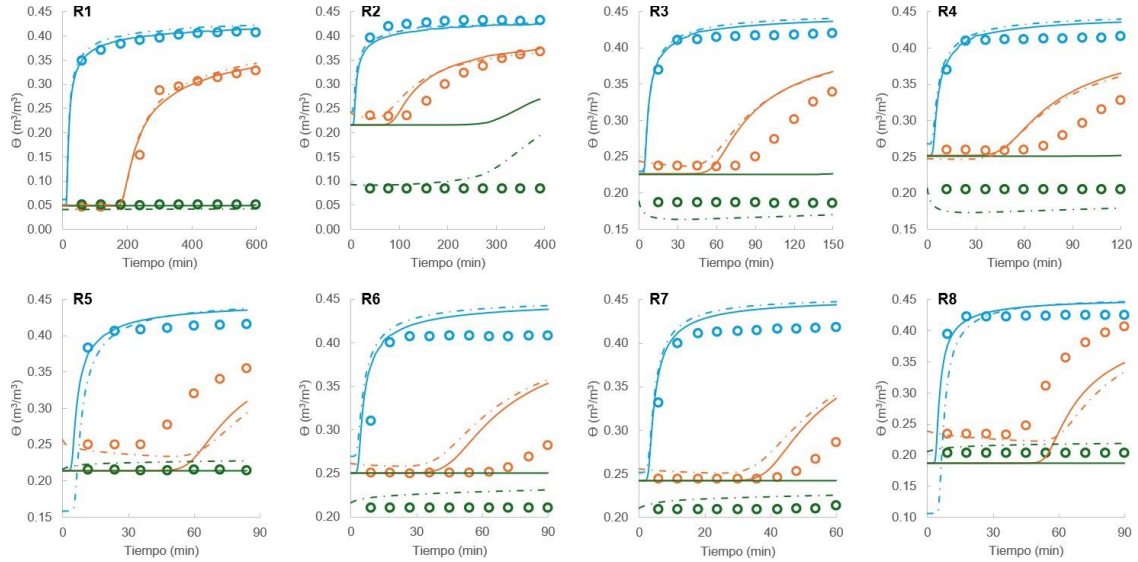


Figura 3.3. Contenidos de agua en el suelo en las ocho pruebas de riego para las estrategias de representación de la humedad inicial en el suelo EST1 (línea continua) y EST2 (línea punteada). Los círculos representan los valores observados y las líneas los simulados. El color azul representa la tendencia de los valores en la ubicación (0,75), el color anaranjado los valores en la ubicación (10,65), y la línea verde los valores en la ubicación (20,55).

Cuadro 3.6. Desempeño del modelo de simulación para las dos estrategias de representación del contenido inicial de agua en el suelo EST1 y EST2.

Prueba	$\theta\theta_i$ uniforme (EST1)				$\theta\theta_i$ por estrato (EST2)			
	r^2	RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	NSE	*Des	r^2	RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	NSE	*Des
R1	0.996	0.010	0.996	E	0.996	0.014	0.992	E
R2	0.906	0.084	0.660	A	0.969	0.032	0.952	E
R3	0.960	0.033	0.884	B	0.961	0.027	0.922	E
R4	0.953	0.034	0.839	B	0.965	0.027	0.899	B
R5	0.903	0.033	0.840	B	0.912	0.033	0.834	B
R6	0.935	0.039	0.770	A	0.937	0.038	0.782	A
R7	0.970	0.028	0.894	B	0.979	0.026	0.904	E
R8	0.909	0.043	0.811	B	0.829	0.043	0.809	B

*Des: Desempeño del modelo E: Excelente; A: Aceptable; B: Bueno.

Los valores de r^2 resultaron ligeramente mayores en la estrategia EST2 que en la estrategia EST1, en los riegos R2, R4, R5 y R7, pero prácticamente iguales en los riegos R1, R3 y R6, y solo en el riego R8 hubo diferencia considerable a favor

de la estrategia EST1. En ambas estrategias, el valor de r^2 supera un valor de 0.90, excepto en el riego R8 de la EST2 cuyo valor fue de 0.83. De manera similar, los valores de RMSE resultaron menores en la estrategia EST2 que en la estrategia EST1 para los riegos R2, R3, R4 y R7, resultaron prácticamente iguales en los riegos R5, R6 y R8, pero resultó mayor en el riego R1. Es importante destacar que, al igual que en el r^2 , las diferencias en los valores de RMSE entre las dos estrategias son mínimas, excepto en el riego R2 donde la diferencia es $0.052 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. En efecto, los índices de NSE y los criterios de calificación de Ritter & Muñoz-Carpena (2013) muestran que hubo un mejor desempeño de la simulación en la estrategia EST2, ya que en cuatro de los riegos fue excelente y solo en un caso fue aceptable, mientras que en la estrategia EST1 solo en un caso fue excelente y en dos casos resultó aceptable.

3.5.4 Robustez del modelo

De forma general, en ambas estrategias de representación del contenido inicial de agua en el suelo se observaron valores mayores de r^2 en los tiempos de riego más largos, para un mismo caudal. Sin embargo, en los valores del RMSE e índice NSE no se observó una tendencia. En el caso particular de los riegos R1 y R2, cuyo caudal de aplicación fue de 1.5 L h^{-1} y tiempos de riego de 600 y 390 minutos, respectivamente, el r^2 fue 0.996 y 0.906 en la estrategia EST1, mientras que en la estrategia EST2 fue 0.996 y 0.969; la menor diferencia en la estrategia EST2 puede ser atribuida a una mejor representación del contenido inicial de agua en el suelo ($\theta\theta_i$) y no al efecto de la disminución del tiempo de riego.

En las pruebas de riego R2, R3, R5 y R7 con caudales de emisión distintos (1.5 , 3.2 , 4.1 y 7.9 L h^{-1}) y con humedades del suelo iniciales similares (0.216 , 0.226 , 0.214 y $0.242 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) según la estrategia EST1, presentaron valores de r^2 similares alrededor de 0.90, a excepción del riego R3 con un valor de 0.960. Los valores del índice NSE califican como bueno el desempeño del modelo en los riegos R3, R5 y R7, y como aceptable al riego R2. En la estrategia EST2 incrementaron los valores de r^2 , respecto a la estrategia EST1, pero fueron similares en los riegos R2, R3 y R7 con valores alrededor de 0.97, en los que el

desempeño de la modelación es calificada como excelente según los valores del índice NSE.

La precisión de la modelación no mostró una tendencia clara respecto al contenido inicial de agua en el suelo; por ejemplo, en las pruebas de riego R5 y R6, con valores iniciales de 0.214 y 0.250 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en la estrategia EST1, pero con el mismo caudal de emisión (4 L h^{-1}) y tiempos de riego similares (84 y 90 min), los valores de r^2 , RMSE y del índice de NSE fueron 0.903 y 0.935, 0.033 y 0.039, 0.84 y 0.77 respectivamente. En los riegos R7 y R8, también con humedades iniciales distintas (0.242 y 0.187 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), pero con el mismo caudal de riego (7.9 L h^{-1}) y con tiempos de riego de 60 y 90 min, los valores de r^2 , RMSE y NSE fueron 0.970 y 0.909, 0.028 y 0.043, 0.894 y 0.811.

3.6 Discusión

3.6.1 Estimación de parámetros hidráulicos del suelo con funciones de pedotransferencia de Rosetta

Se hace evidente que la precisión y exactitud de las simulaciones depende de los parámetros hidráulicos utilizados; sin embargo, obtener los parámetros mediante mediciones directas suele ser costoso y requiere de mucho tiempo, disminuyendo así la utilidad de las simulaciones (Skaggs et al., 2004). Una alternativa para obtener los parámetros hidráulicos es mediante las funciones de pedotransferencia de Rosetta que utiliza datos de variables del suelo que pueden ser obtenidos con mayor facilidad o disponibles en la mayoría de las bases de datos de suelo (porcentajes de arena, limo y arcilla, densidad aparente, contenido de agua a 33 y 1500 kPa). Los parámetros estimados en Rosetta pueden funcionar adecuadamente para diferentes suelos; sin embargo existe la posibilidad de que estos no funcionen igual de bien para otros sitios, ya que las funciones de pedotransferencia tienen una amplia gama de variabilidad en cuanto a precisión de predicción (Abdelbaki, 2021). En efecto, en nuestro estudio, de los cinco conjuntos de valores de los parámetros estimados con funciones de pedotransferencia de Rosetta, solo los conjuntos C2, C4 y C5 convergieron para

las dos estrategias de representación de la humedad inicial en el suelo; el conjunto C1 no convergió en ninguna estrategia (Cuadro 3.4); sin embargo, es difícil determinar el origen del problema pues una solución adecuada depende de la certidumbre en las condiciones de frontera y condiciones iniciales, de la unicidad y valores dentro de rango de los parámetros (J Šimůnek, van Genuchten, & M. Šejna, 2012).

A pesar de que el conjunto C5 fue estimado con una mayor información del suelo, no se observó que produjeran una mejor representación de la distribución espacio temporal de la humedad. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Skaggs et al. (2004), quienes probaron en riego por goteo subsuperficial cuatro conjuntos de valores de los parámetros obtenidos con Rosetta, donde cada conjunto fue estimado con diferente cantidad de información del suelo, encontrando que los cuatro conjuntos de datos generan resultados aproximadamente iguales. Por otro lado, Domínguez-Niño et al. (2020) compararon un conjunto de valores de parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con las funciones de pedotransferencia de Rosetta y con los obtenidos mediante HYPROP + WP4C, y encontraron que los parámetros obtenidos con Rosetta son útiles para predecir tendencias generales; sin embargo, encontraron que si se requiere mejorar la modelación es necesario realizar una caracterización específica del suelo pudiendo ser una alternativa el uso de HYPROP + WP4C. En este sentido, Skaggs et al. (2004) y Ventrella et al. (2019) concuerdan en que para una mejor representación de la distribución espacio temporal de la humedad se requieren obtener mediante pruebas de campo o laboratorio los parámetros $\theta\theta_s$, K_s y que las funciones de pedotransferencia de Rosetta son adecuadas para obtener los parámetros a , n , l y $\theta\theta_r$.

3.6.2 Optimización de los parámetros hidráulicos del suelo

Los valores de los estadísticos para medir el desempeño de la modelación del comportamiento del contenido de agua en el suelo (Cuadro 3.6), muestran que el modelo de simulación inversa incluido en HYDRUS 2D estimó suficientemente bien las propiedades hidráulicas del suelo en las dos estrategias de

representación del contenido inicial del suelo, ya que el coeficiente de determinación (r^2) mejoró sustancialmente con respecto a lo obtenido con los conjuntos de valores obtenidos con Rosetta; por ejemplo, en la estrategia EST1 se obtuvo un valor de 0.96 en lugar del 0.72 obtenido con el conjunto de valores C3. De manera similar, para la estrategia EST2, el valor de r^2 pasó de 0.74 con el conjunto C5 a 0.96 con los parámetros optimizados. Similarmente, los valores de RMSE se redujeron considerablemente y los valores del índice NSE se incrementaron drásticamente. Ket et al. (2018) reportaron valores de RMSE entre 0.05 y 0.13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ con parámetros sin optimizar y valores de RMSE entre 0.02 y 0.03 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ con parámetros optimizados en HYDRUS 1D en riego por goteo superficial. Del mismo modo, Arbat et al. (2005) encontró una reducción en la suma de cuadrados de los residuos ponderados (SSQ) con la optimización de los parámetros $\theta\theta_s$ y K_s pasando de un valor de 0.876 a 0.492; posteriormente, en una segunda etapa donde se optimizaron los parámetros n y $\theta\theta_r$, los valores de SSQ pasaron de 0.492 a 0.413, sin embargo no encontró una reducción del valor de SSQ con la optimización del parámetro α .

A pesar de que los valores de los parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con simulación inversa mejoran considerablemente el desempeño de las modelaciones del contenido volumétrico del agua en el suelo, Ket et al. (2018) sugieren partir de valores iniciales que sean congruentes con las características de los suelos. Si bien, HYDRUS 2D incluye un catálogo de valores de los parámetros hidráulicos de los suelos para diferentes clases texturales, que considera los obtenidos por Carsel & Parrish (1988) y los obtenidos con las funciones de pedotransferencia de Rosetta, es importante examinar el uso estandarizado de estos valores ya que ellos representan los promedios de las clases texturales (Yunfeng Li et al., 2023); en este sentido, el usuario debe analizar cuidadosamente el utilizar parámetros predeterminados en el modelo HYDRUS 2D.

3.6.3 Dinámica del contenido del agua del suelo con las dos estrategias de representación de contenido inicial de agua en el suelo

El modelo generado en HYDRUS 2D con los parámetros hidráulicos del suelo optimizados mediante simulación inversa representó adecuadamente la dinámica espacio temporal del $\theta\theta$ de las pruebas de riego por goteo superficial realizadas en el modelo físico experimental. En general los valores de r^2 fueron mayores de 0.90 para ambas estrategias de representación del $\theta\theta_i$ y solamente en el riego R8 presentó una disminución del valor de r^2 al pasar de 0.909 en la estrategia EST1 a 0.829 en la estrategia EST2. Los valores de RMSE variaron dentro del rango de 0.010 a 0.084 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para la estrategia EST1 y para la estrategia EST2 entre 0.014 a 0.043. Es importante resaltar que no se observaron mejoras considerables en la precisión de la modelación en la mayoría de los riegos, en el uso de la estrategia EST1 o estrategia EST2; solamente en el riego R2 mejoró considerablemente en la estrategia EST2 debido a que se representó mejor el contenido inicial de humedad de los estratos E3 y E4, cuyos valores eran significativamente menores que en los estratos E1 y E2. Estos resultados demuestran que la representación uniforme del contenido inicial de agua en el suelo es suficiente para obtener buenos resultados en las simulaciones de la dinámica $\theta\theta$ y solo se requiere una representación diferenciada por estratos cuando exista una variación importante del $\theta\theta_i$ en la dirección vertical del perfil del suelo.

3.6.4 Validez del modelo sujeto a factores de operación del riego y condición del suelo

El tiempo de riego y caudal del emisor son dos factores importantes en el proceso de infiltración y movimiento de agua en el suelo ya que determinan la cantidad de agua aplicada como riego. En la medida en que se aumenta la cantidad de riego, la región mojada del suelo aumenta tanto horizontal como verticalmente, adicionalmente, la uniformidad de riego es influenciada por la cantidad de agua aplicada, una cantidad de agua pequeña propicia una baja uniformidad de riego (Chen et al., 2014). En efecto, en la aplicación del riego, el tiempo de riego y el

caudal del emisor varían en función de las condiciones atmosféricas del lugar, del tipo de cultivo y su etapa vegetativa, de la condición de humedad inicial en el suelo y del tipo de suelo entre otros factores, por lo que son importantes las modelaciones del comportamiento espacio-temporal de la humedad en el suelo que incluyan a los factores más influyentes en un amplio rango de valores, acorde con las situaciones reales, y que las modelaciones sean correctas en dichos rangos.

Los resultados de las simulaciones realizadas en este estudio no muestran diferencias considerables en la precisión de la modelación entre tiempos cortos y tiempos largos de riego (Cuadro 3.6). Los valores de r^2 y RMSE tuvieron una ligera diferencia en las pruebas de riego con mismo caudal y diferentes tiempos de riego (R1-R2, R3-R4, R5-R6 y R7-R8) para ambas estrategias de representación de la humedad inicial en el suelo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Skaggs et al. (2004), quienes obtuvieron valores similares de RMSE, de 0.031, 0.027 y 0.041 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, en modelaciones con caudal de emisión de cintilla de riego de 40 L m^{-1} y tiempos de riego de 5.5 h, 10.75 h y 16 h.

En las pruebas de riego con $\theta\theta_i$ similares (R2, R3, R5 y R7), pero con caudal de emisión diferente, se observó que los valores de los parámetros estadísticos se mantuvieron alrededor de 0.90 para r^2 y alrededor 0.8 para NSE, calificando el desempeño del modelo como bueno. Valores similares fueron obtenidos por Naglič et al. (2014), quienes evaluaron simulaciones de dimensiones de patrón de humedecimiento de cinco tasas de aplicación de riego (0.11, 0.49, 0.99, 1.151 y 2.05 L h^{-1}), encontrando valores de RMSE de 0.4 a 1.1 cm en dirección horizontal y de 0.4 a 2.6 cm en dirección vertical. Del mismo modo, García Morillo et al. (2017) encontraron valores de RMSE y r^2 en rangos de 0.62 a 2.1 cm y de 0.98 a 0.99, respectivamente, en pruebas del patrón de humedecimiento en un contenedor de suelo con caudales de emisión de 0.6 y 1.0 L h^{-1} . Estos resultados aportan certeza al modelo para poder representar la dinámica de $\theta\theta$ con diferentes caudales de aplicación en riego por goteo superficial.

El contenido de humedad inicial en el suelo también juega un papel importante en la infiltración y redistribución del agua en el suelo. En efecto, Skaggs et al. (2010) encontraron que el movimiento horizontal del agua en el suelo es determinado por esta condición inicial, las propiedades hidráulicas del suelo, tiempo riego, caudal del emisor y la forma de aplicar el riego (por pulsos o continuo). Del mismo modo, Cristóbal-Muñoz et al. (2022) encontraron que un aumento en $\theta\theta_i$ genera frentes de humedecimiento de mayor magnitud vertical y horizontal. En este sentido, es importante analizar el efecto de la humedad inicial del suelo en las simulaciones del $\theta\theta$ con HYDRUS 2D. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que $\theta\theta_i$ no afecta el desempeño del modelo generado en HYDRUS 2D, ya que los valores de los parámetros estadísticos r^2 y RMSE no tuvieron diferencias apreciables entre pares de pruebas de riego con el mismo caudal y diferente $\theta\theta_i$ (R1-R2, R3-R4, R5-R6, R7-R8).

Con un modelo generado en HYDRUS 2D que sea capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento espacio-temporal del de contenido de humedad en el suelo en diferentes condiciones de humedad inicial $\theta\theta_i$, con diferentes tiempos de riego y caudal de aplicación, se puede generar una base de datos con diferentes escenarios de prácticas de aplicación de riego y tipos de suelo, y con ello obtener modelos matemáticos empíricos para estimar la profundidad y diámetro del patrón de humedecimiento. Por ejemplo, con dicha estrategia Naglič et al. (2014) obtuvieron nuevos parámetros de ajuste para el modelo empírico de Schwartzman & Zur (1986), el cual estima la dimensión horizontal y vertical del patrón de humedecimiento en riego por goteo superficial. De la misma forma, Fan et al. (2019) generaron un modelo empírico para estimar el patrón de humedecimiento en sistemas de riego por orificios en películas plásticas (FHI); para ello realizaron simulaciones en HYDRUS 2D con diferentes clases texturales de suelo, diferentes diámetros del orificio y cargas hidráulicas. Por su parte, Yuchen Li et al. (2023) desarrollaron un modelo matemático empírico para estimar el patrón de humedecimiento para riego por goteo a partir de simulaciones en HYDRYS 2D de 12 clases texturales. Los modelos generados con valores simulados, pueden estimar el patrón de humedecimiento factor

crucial para el diseño y operación de sistemas de riego por goteo.

3.7 Conclusiones

El modelo computacional HYDRUS 2D puede ser útil para el diseño y operación de sistemas de riego superficial, ya que representa adecuadamente el comportamiento espacio temporal de las pruebas riego con valores de caudales de los emisores en el rango de los comerciales y comúnmente usados, con humedades del suelo previas al riego entre el punto de marchitez permanente y capacidad de campo, y tiempos de riego diferentes para humedecer el suelo al menos hasta capacidad de campo.

Los valores de las propiedades hidráulicas obtenidos con las funciones de pedotransferencia de Rosetta, integradas en HYDRUS 2D, pueden ser una alternativa como valores de partida en la búsqueda de los óptimos para mejorar la precisión de las simulaciones.

El modelo generado en HYDRUS 2D es robusto, ya que la representatividad de las simulaciones es similar en el rango de valores analizados de los factores más influyentes en el comportamiento del bulbo de mojado, representados por el contenido inicial del agua en el suelo, caudal del emisor y tiempo de riego. Lo anterior brinda mayor certeza para modelar en HYDRUS 2D diferentes escenarios que permitan diseñar y operar sistemas de riego por goteo superficial.

Es deseable considerar la humedad inicial del suelo por estratos, pero para facilitar la alimentación del modelo se puede usar un valor de humedad homogéneo en el dominio computacional, sacrificando ligeramente el desempeño de la modelación en los casos en que las diferencias de humedad en el sentido vertical sean pequeñas. Esto permitirá disminuir los costos de adquisición de la información y disminuir el costo computacional para la modelación.

3.8 Literatura citada

Abdelbaki, A. M. (2021). Selecting the most suitable pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity according to the available soil

- inputs. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2603–2615. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.030>
- Arbat, G., Puig, J., Barragan, J., Bonany, J., & Cartagena, F. R. (2005). Modelación directa e inversa de la dinámica del agua en una plantación de manzanos regada por microaspersión. *VII Jornadas de Investigación En La Zona No Saturada Del Suelo*, VII, 243–248.
- Bufon, V. B., Lascano, R. J., Bednarz, C., Booker, J. D., & Gitz, D. C. (2012). Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrigation Science*, 30(4), 259–273. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0279-z>
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755–769. <https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755>
- Chen, L.-J., Feng, Q., Li, F.-R., & Li, C.-S. (2014). A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water. *Agricultural Water Management*, 146(December), 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.021>
- Chen, N., Li, X., Šimůnek, J., Shi, H., Hu, Q., & Zhang, Y. (2020). Evaluating soil nitrate dynamics in an intercropping dripped ecosystem using HYDRUS-2D. *Science of The Total Environment*, 718, 137314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137314>
- Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, 22(3–4), 143–156. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0080-8>
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water*, 14(11), 1827. <https://doi.org/10.3390/w14111827>
- Dabach, S., Lazarovitch, N., Šimůnek, J., & Shani, U. (2013). Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science*, 31(1), 27–36. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0289-x>
- Domínguez-Niño, J. M., Arbat, G., Rajj-Hoffman, I., Kisekka, I., Girona, J., & Casadesús, J. (2020). Parameterization of Soil Hydraulic Parameters for HYDRUS-3D Simulation of Soil Water Dynamics in a Drip-Irrigated Orchard. *Water*, 12(7), 1858. <https://doi.org/10.3390/w12071858>
- Egea, G., Castro-Valdecantos, P., Gómez-Durán, E., Munuera, T., Domínguez-

- Niño, J. M., & Nortes, P. A. (2024). Impact of Irrigation Management Decisions on the Water Footprint of Processing Tomatoes in Southern Spain. *Agronomy*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy14081863>
- Elmaloglou, S., Soulis, K. X., & Dercas, N. (2013). Simulation of Soil Water Dynamics Under Surface Drip Irrigation from Equidistant Line Sources. *Water Resources Management*, 27(12), 4131–4148. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0399-8>
- Elnesr, M. N., & Alazba, A. A. (2019). Computational evaluations of HYDRUS simulations of drip irrigation in 2D and 3D domains (i-Surface drippers). *Computers and Electronics in Agriculture*, 162(December 2018), 189–205. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.035>
- Fan, Yan-wei, Ren, C., Yang, Z., Zhang, C., & Yin, W. (2024). Prediction of wetting pattern dimensions under moistube irrigation with a multivariate nonlinear model. *Water Science and Engineering*, 17(3), 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.12.006>
- Fan, Yanwei, Shao, X., Gong, J., & Wang, Y. (2019). An empirical model for estimating soil wetting pattern dimensions during film hole irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(13), 1765–1779. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1694147>
- García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J. A., Camacho, E., & Montesinos, P. (2017). Drip Irrigation Scheduling Using Hydrus 2-D Numerical Model Application for Strawberry Production in South-West Spain. *Irrigation and Drainage*, 66(5), 797–807. <https://doi.org/10.1002/ird.2177>
- 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.
- Kandelous, M. M., & Šimůnek, J. (2010). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28(5), 435–444. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0205-9>
- Ket, P., Oeurng, C., & Degré, A. (2018). Estimating Soil Water Retention Curve by Inverse Modelling from Combination of In Situ Dynamic Soil Water Content and Soil Potential Data. *Soil Systems*, 2(4), 55. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2040055>
- Khashaei, F., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., & Azad, N. (2023). Field evaluation and numerical simulation of water and nitrate transport in subsurface drip irrigation of corn using HYDRUS-2D. *Irrigation Science*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00890-7>

- Kwon, S. H., Kim, D. H., Kim, J. S., Jung, K. Y., Lee, S. H., & Kwon, J. K. (2020). Soil water flow patterns due to distance of two emitters of surface drip irrigation for horticultural crops. *Horticultural Science and Technology*, 38(5), 631–644. <https://doi.org/10.7235/HORT.20200058>
- Li, W., Awais, M., Ru, W., Shi, W., Ajmal, M., Uddin, S., & Liu, C. (2020). Review of Sensor Network-Based Irrigation Systems Using IoT and Remote Sensing. *Advances in Meteorology*, 2020, 8396164. <https://doi.org/10.1155/2020/8396164>
- Li, Yuchen, Nie, W.-B., & Feng, Z.-J. (2023). Development of a soil wetting pattern estimation model for drip irrigation. *Water Supply*, 23(1), 144–161. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.429>
- Li, Yunfeng, Yu, Q., Ning, H., Gao, Y., & Sun, J. (2023). Simulation of soil water, heat, and salt adsorptive transport under film mulched drip irrigation in an arid saline-alkali area using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 290(April), 108585. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108585>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conduc. *Water Resources Research*, 12(3), 513–522.
- Mubarak, I., Mailhol, J. C., Angulo-Jaramillo, R., Bouarfa, S., & Ruelle, P. (2009). Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 96(11), 1547–1559. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.011>
- N. Moriasi, D., G. Arnold, J., W. Van Liew, M., L. Bingner, R., D. Harmel, R., & L. Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Naglič, B., Kechavarzi, C., Coulon, F., & Pintar, M. (2014). Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. *Irrigation Science*, 32(6), 421–436. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0439-z>
- Provenzano, G. (2007). Using HYDRUS-2D Simulation Model to Evaluate Wetted Soil Volume in Subsurface Drip Irrigation Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 342–349. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(342\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(342))
- Reyes-Esteves, R. G., & Slack, D. C. (2019a). Modeling Approaches for Determining Appropriate Depth of Subsurface Drip Irrigation Tubing in Alfalfa. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(10), 04019021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001409](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001409)

- Reyes-Esteves, R. G., & Slack, D. C. (2019b). Modeling of soil water to ensure a suitable depth and spacing of subsurface drip irrigation for alfalfa. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(1), 69–79. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.02.002>
- Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Romero, P. J., Razuri, R. L., Peña, C., & Romero, E. (2015). Distribución de cationes en el bulbo humedo del fertirriego en el cultivo de pimentón (*Capsicum annuum* L .) Con cintas de goteo. *Conocimiento Libre y Licenciamiento*, 6(9), 120–131.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- Schwartzman, M., & Zur, B. (1986). Emitter Spacing and Geometry of Wetted Soil Volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(3), 242–253. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1986\)112:3\(242\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242))
- Šimůnek, J, van Genuchten, M., & Šejna, M. (2012). *The HYDRUS Software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Technical manual, Version 2.0.* (p. 258). Pc Progress.
- Šimůnek, J, van Genuchten, M. T., & M. Šejna, A. (2012). HYDRUS: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1263–1276. <https://doi.org/10.13031/2013.42239>
- Šimůnek, Jirí, van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2008). Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587–600. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., & Rothfuss, Y. (2010). Drip Irrigation Water Distribution Patterns: Effects of Emitter Rate, Pulsing, and Antecedent Water. *Soil Science Society of America Journal*, 74(6), 1886–1896. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0341>
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 304–310. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:4\(304\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304))

- Soulis, K. X., & Elmaloglou, S. (2016). Optimum Soil Water Content Sensors Placement in Drip Irrigation Scheduling Systems: Concept of Time Stable Representative Positions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(11), 4016054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001093](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001093)
- Sun, L., Li, B., Yao, M., Mao, L., Zhao, M., Niu, H., Xu, Z., Wang, T., & Wang, J. (2023). Moderate water deficit and nitrogen application rate are conducive to improving the nitrogen uptake and yield of greenhouse tomatoes. *Rhizosphere*, 28(September), 100789. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100789>
- Ventrella, D., Castellini, M., Di Prima, S., Garofalo, P., & Lassabatère, L. (2019). Assessment of the Physically-Based Hydrus-1D Model for Simulating the Water Fluxes of a Mediterranean Cropping System. *Water*, 11(8), 1657. <https://doi.org/10.3390/w11081657>
- Zhang, J., Xiang, L., Zhu, C., Li, W., Jing, D., Zhang, L., Liu, Y., Li, T., & Li, J. (2023). Evaluating the irrigation schedules of greenhouse tomato by simulating soil water balance under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 283(February), 108323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108323>

4 EVALUACIÓN DEL MODELO HORTSYST BAJO UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE TOMATE EN FERTIRRIEGO

Victor Hugo Meneses Ramirez^a, Jorge Victor Prado Hernández^{b*}, Antonio Martínez Ruiz^c, Noe Velázquez López^d, Agustín Ruíz García^d

^aPosgrado de ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, C.P. 56230, Texcoco, Estado de México, México.

^bDepartamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, C.P. 56230, Texcoco, Estado de México, México.

^cInstituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), C.E. Valles Centrales de Oaxaca, Melchor Ocampo No.7, Sto. Domingo Barrio Bajo, C.P. 68200, Villa de Etla, Oaxaca.

^dDepartamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, C.P. 56230, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia: jpradoh@chapingo.mx

4.1 Resumen

En la presente investigación se planteó evaluar el modelo de cultivo HortSyst para predecir la evapotranspiración del cultivo (ET_c) acumulada (mm) de tomate en un invernado con fertirriego en suelo, mediante su comparación con los obtenidos por un balance hídrico en dos ciclos de cultivo en 2023 y 2024. Se usaron dos variedades de tomate tipo saladette a doble tallo por planta en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica y ventilación natural. Las plántulas fueron establecidas en un suelo de textura franca en un arreglo de marco real y una densidad de plantación de 1.96 plantas m⁻². La solución nutritiva fue aplicada por riego con goteo superficial. Para registrar los valores de las variables, temperatura del aire (Ta), humedad relativa (HR) y radiación global (Rg) se instaló una estación meteorológica dentro del invernadero. Para obtener la información de la variación de la humedad del suelo, se instalaron tres sensores puntuales a diferentes profundidades y una sonda multiprofundidad. Para las simulaciones, se usaron valores reportados en la literatura de los parámetros de calibración del modelo HortSyst, los cuales fueron obtenidos con datos experimentales de un sistema hidropónico en un invernadero ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo. Los parámetros estadísticos de cuantificación del error mostraron un buen desempeño del modelo HortSyst durante el ciclo 2023, con valores del índice NSE de 0.852 y RMSE de 178.219 mm. El desempeño del modelo disminuyó considerablemente durante el ciclo 2024, con valores del índice NSE de 0.183 y RMSE de 355.48 mm. La disminución del desempeño del modelo durante el ciclo 2024 se asocia a Ta mayores a 35 °C y

HR mayores a 80%. Los resultados sugieren que el modelo Hortsyst puede ser una alternativa para la aplicación del fertirriego en tiempo real en suelo.

Palabras clave: Balance hídrico, evapotranspiración del cultivo, invernadero, modelo de cultivo.

Tesis de Doctorado en ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Victor Hugo Meneses Ramirez

Director de Tesis: Dr. Jorge Victor Prado Hernández

4.2 Abstract

In the present investigation, it was proposed to evaluate the Horsyst crop model to predict the accumulated crop evapotranspiration (ET_c) (mm) of tomato in a greenhouse with fertigation in the soil, by comparing it with those obtained by a water balance in two crops cycles in 2023 and 2024. Two double-stemmed saladette tomato varieties were used per plant in a tunnel-type greenhouse with plastic cover and natural ventilation. The seedlings were established in a loam textured soil into a real frame and a planting density of 1.96 plants m⁻². The nutrient solution was applied by surface drip irrigation. To record the values of the variables, air temperature (Ta), relative humidity (HR), and global radiation (Rg), a meteorological station was installed inside the greenhouse. To obtain information on soil moisture variation, three point sensors at different depths and a multidepth probe were installed. For the simulations, values reported in the literature of the calibration parameters of the HorSyst model which were obtained with experimental data from a hydroponic system in a greenhouse located in the facilities of the Autonomous University of Chapingo. The statistical error quantification parameters showed good performance of the HortSyst model during the 2023 cycle, with NSE index values of 0.852 and RMSE of 178.219 mm. The model performance decreased considerably during the 2024 cycle, with NSE index values of 0.183 and RMSE of 355.48 mm. The decrease in model performance during the 2024 cycle is associated with Ta over than 35 °C and HR over 80%. The results suggest that the Hortsyst model can be an alternative for the application of fertigation in real time in soil.

Keywords: water balance; crop evapotranspiration; greenhouse; crop model

4.3 Introducción

Los sistemas de producción agrícola se encuentran bajo mucha presión, factores como la demanda creciente de alimentos, el incremento de la población, el cambio climático, la contaminación de fuentes de agua y la competencia de otros sectores económicos por el uso del agua, hacen que el agua para su uso en la agricultura se encuentra cada vez más limitada (Gallardo et al., 2020; Li et al., 2020; Skaggs et al., 2004). Estas condiciones demandan el establecimiento de estrategias para hacer un uso cada vez más controlado y eficiente del agua de riego que permitan aumentar los rendimientos de los cultivos.

La producción intensiva en invernaderos se presenta como una opción que permite incrementar la eficiencia en el uso de agua de 3 a 10 veces más que en

condiciones de campo abierto (Katsoulas & Stanghellini, 2019; Stanghellini, 2014). Además, la producción de cultivos en invernadero aporta ventajas significativas sobre la producción a cielo abierto, ya que permite aislar al cultivo dentro del invernadero de condiciones adversas del ambiente externo y permite controlar factores como la temperatura, radiación, humedad relativa, concentración de CO₂, etc. (Juárez-Maldonado et al., 2017).

Los requerimiento de agua de los cultivos a campo abierto comúnmente son estimados en base a un balance hídrico, donde la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se estima como la diferencia de los aportes de agua (riego, lluvia y capilaridad), las extracciones (escurrimiento superficial y drenaje profundo) y el cambio en el contenido de agua en el suelo (Allen et al., 1998). En condiciones de invernadero no existe el aporte por lluvia y por capilaridad, además no se presenta el escurrimiento superficial y la variación del contenido de agua del suelo es muy pequeña debido a que continuamente se repone a capacidad de campo, en consecuencia se puede asumir que los requerimientos de agua de los cultivos en invernadero son equivalentes a la ET_c (Incrocci et al., 2020).

Generar estrategias de riego eficaces requiere además de la comprensión del balance hídrico del suelo, del conocimiento de las interrelaciones entre el suelo, clima y el desarrollo de los cultivos (Sun et al., 2023; Zhang et al., 2023). En este sentido, la estimación de las necesidades de agua de riego del cultivo mediante modelos de cultivo permite diseñar prácticas de manejo de riego que incrementen la productividad de los cultivos, ya que una vez calibrados pueden simular con precisión el sistema suelo-cultivo-atmosfera (Gu et al., 2020).

Martínez-Ruiz et al. (2019) desarrollaron el modelo HortSyst que permite ajustar programas de nutrición y riego en sistemas hidropónicos de producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. HortSyst predice la producción total de materia seca (DMP), la absorción de nitrógeno (N_{up}), fósforo (P_{up}), potasio (K_{up}), calcio (Ca_{up}), magnesio (Mg_{up}), índice de área foliar (LAI) y la transpiración del cultivo (ET_c), en base a mediciones horarias de temperatura del aire (Ta),

humedad relativa (HR) y radiación solar global (Rg) (Martínez-Ruiz, Pineda-Pineda, et al., 2020; Martínez-Ruiz, Sánchez-García, et al., 2020). El modelo asume que el cultivo es manejado con prácticas culturales realizadas en invernaderos comerciales, se encuentra libre de plagas y enfermedades y que se desarrolla sin ningún tipo de estrés por nutrientes y agua. Sin embargo en condiciones de cultivo en suelo pueden presentarse limitaciones de agua debido a las características hidráulicas del suelo, los procesos de distribución del agua, aire, nutrientes y el crecimiento de raíces en contenedores de crecimiento espacialmente aislados presentan marcadas diferencias con respecto a los suelos no confinados (Gohardoust et al., 2021). En base a lo expuesto, el objetivo del presente estudio es evaluar el modelo de cultivo HortSyst para predecir la evapotranspiración del cultivo (ET_c) de un sistema de producción de tomate en invernadero con fertirriego.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Sitio experimental

Se estableció un experimento en los ciclos de cultivo 2023 y 2024 en un invernadero tipo túnel ubicado en el municipio de Texcoco Estado de México, a una altitud de 2 267 m sobre el nivel medio del mar, con coordenadas geográficas 19°32'42.2" latitud Norte y 98°51'39.7" longitud Oeste. El estudio se llevó a cabo en un invernadero con cubierta de plástico y techo curvo sin ventila cenital, con altura de larguero longitudinal de 1.5 m y altura a la cumbrera de 3.4 m, ancho de 4.0 m y 12.0 m de largo y orientado en dirección norte-sur. El invernadero cuenta con dos ventanas laterales y dos frontales con malla anti-áfidos de 1.20 m de altura.

El suelo en el invernadero se clasificó como Franco (arena = 44%, arcilla = 26.7%, limo = 19.3%), según la clasificación del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), con densidad aparente de 1.26 g cm⁻³, materia orgánica 2.65%, contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (θ_{cc}) de 0.3 cm³ cm⁻³, contenido de agua en el suelo a punto de marchitez

permanente ($\theta\theta_{PMP}$) de 0.17 cm³ cm⁻³, pH de 6.9 y CE de 0.42 dS m⁻¹. Otras propiedades químicas del suelo se presentan en Cuadro 4.1 y los parámetros de calidad del agua de riego se presentan en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.1. Propiedades químicas del suelo.

mg kg ⁻¹									meq 100g ⁻¹
NO ₃ ⁻	P	K	Ca	Mg	Na	B	Fe	Zn	ClC
34.3	127.3	1009.0	2380.0	570.0	78.0	0.9	18.0	8.5	20.0

Cuadro 4.2. Parámetros de calidad del agua de riego

dS m ⁻¹		meq L ⁻¹							
pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ⁴⁻	B
8.6	0.45	0.76	0.82	0.42	0.79	0.85	2.5	0.27	0.40

4.4.2 Establecimiento del cultivo

En el presente estudio se cultivaron dos variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tipo saladette de crecimiento indeterminado, cultivadas en un sistema de producción de invernadero con fertirriego a doble tallo por planta. En el ciclo 2023 se utilizó la variedad cv. “El Cid F1” cuya siembra se realizó el día 20 de marzo del 2023 y el trasplante se llevó a cabo el 17 de abril de mismo año. En el ciclo 2024 se utilizó la variedad cv. “Sun7705” la cual se sembró 22 de marzo de 2024 y se trasplanto el 18 de abril del mismo año.

Las plántulas de tomate se plantaron en camas de cultivo de forma trapezoidal con una base mayor de 1.0 m, base menor de 0.7 m y una altura de 0.15 m. La distancia entre camas de 1.7 m y entre planta de 0.3 m para una densidad de plantación 1.96 plantas m⁻². Para evitar la evaporación del agua del suelo se colocó en la superficie de la cama un acolchado plástico negro-plata.

Se realizaron prácticas culturales comunes en invernaderos comerciales como el tutoreo, poda de hoja, deschupone además el cultivo fue inspeccionado

regularmente para identificar posibles plagas y enfermedades y realizar aplicaciones de preventivas cuando fuera necesario.

4.4.3 Programación de riego y manejo de solución nutritiva

Las camas de cultivo fueron regadas por un sistema de riego por goteo, cada cama de cultivo contaba con una doble línea de estacas colocadas a 0.12 m del centro de la cama y 0.20 m entre estacas, las estacas fueron alimentadas por un lateral con goteros de botón auto compensados de 2.0 L h⁻¹ con un sistema de distribución de cuatro salidas y un caudal de 0.47 L h⁻¹ por salida.

A partir del día 15 después del trasplante (DDT), las plantas se regaron hasta reponer el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo. Para estimar la lámina de riego se utilizó la expresión (Aslan et al., 2024; Baştuğ et al., 2024):

$$I = (\theta\theta_{CC} - \theta\theta_A)Z \quad (4.1)$$

donde I es el volumen de riego aplicado (mm), $\theta\theta_{CC}$ es el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (cm³ cm⁻³), $\theta\theta_A$ es el contenido de agua en el suelo actual (cm³ cm⁻³) y Z es la profundidad de muestreo de 0.45 m.

La solución nutritiva se estimó a partir de los requerimientos totales de nutrimentos para el cultivo de tomate, de acuerdo a Bertsch. (2009) para producir una tonelada de cosecha se requiere de 2.97 kg de N, 0.58 kg de P, 5.26 kg de K, 2.52 kg de Ca, 0.99 kg de Mg y 1.43 kg de S, estos valores fueron multiplicados por 250 considerando este valor como rendimiento esperado. De los requerimientos de nutrientes totales se restó el aporte nutrimental del suelo (Cuadro 4.1) y el agua (Cuadro 4.2). El programa de fertirriego se calculó semanalmente considerando la demanda nutricional de la etapa fenológica y se aplicó diariamente mediante el sistema de riego. Los fertilizantes utilizados para la preparación de la solución nutritiva fueron: nitrato de amonio, nitrato de potasio, nitrato de calcio, nitrato de magnesio, sulfato mono potásico, sulfato de potasio y sulfato de magnesio, para ajustar el pH de la solución ácido nítrico y ácido

fosfórico.

4.4.4 Datos climáticos y contenido volumétrico de agua del suelo

Al interior del invernadero se instaló una estación climática de monitoreo remoto (Onset Computer Corporation ®) para monitorear las variables: temperatura del aire (T_a , °C), humedad relativa (HR, %), radiación solar global (R_g , $W\ m^{-2}$) y contenido volumétrico de agua en el suelo ($m^3\ m^{-3}$). La T_a y HR se midieron con un sensor modelo RXW-THC-900 (HOBOnet) instalado a una altura de 1.5 m. La R_g se midió con un sensor S-LIB-M003 (HOBOnet, ONSET) instalado a 3.0 m de altura. El contenido volumétrico de agua en el suelo se midió con sensores puntuales modelo RXW-SMD-900 (HOBOnet) y una sonda multi-profundidad RXW-GP6-900 (HOBOnet) de 0.9 m de longitud y seis estratos de muestreo. Los sensores puntuales fueron instalados debajo de la estaca (emisor) a una profundidad de 0.05, 0.17 y 0.29 m durante el ciclo 2023 y a una profundidad de 0.075, 0.225 y 0.375 m durante el ciclo 2024 (Figura 4.1). La sonda multi-profundidad se instaló al centro de la cama de cultivo a 0.05 m del tallo de una planta para ambos ciclos de cultivo (Figura 4.1). Todos los sensores fueron conectados a un registrador de datos modelo RX300 (HOBOnet, ONSET). Los datos se registraban cada cinco minutos y se promediaron para obtener valores horarios.

4.4.5 Determinación de la evapotranspiración del cultivo

La ET_c se determinó diariamente en ambos ciclos de cultivo, durante el ciclo de cultivo 2023 se calculó la ET_c a partir del día de trasplante (17 de abril de 2023) y hasta el día 23 de noviembre del mismo año (220 DDT). Para el ciclo 2024 la ET_c se calculó a partir del día de trasplante (17 de abril de 2024) y hasta el día 25 de octubre del mismo año (190 DDT). Los valores de ET_c se calcularon utilizando la ecuación de balance hídrico (Abanto-Rodríguez et al., 2020; Aslan et al., 2024; Baştuğ et al., 2024; Gallardo et al., 2014; Kang et al., 2012):

$$ET_c = \pm \Delta h + I - D \quad (4.2)$$

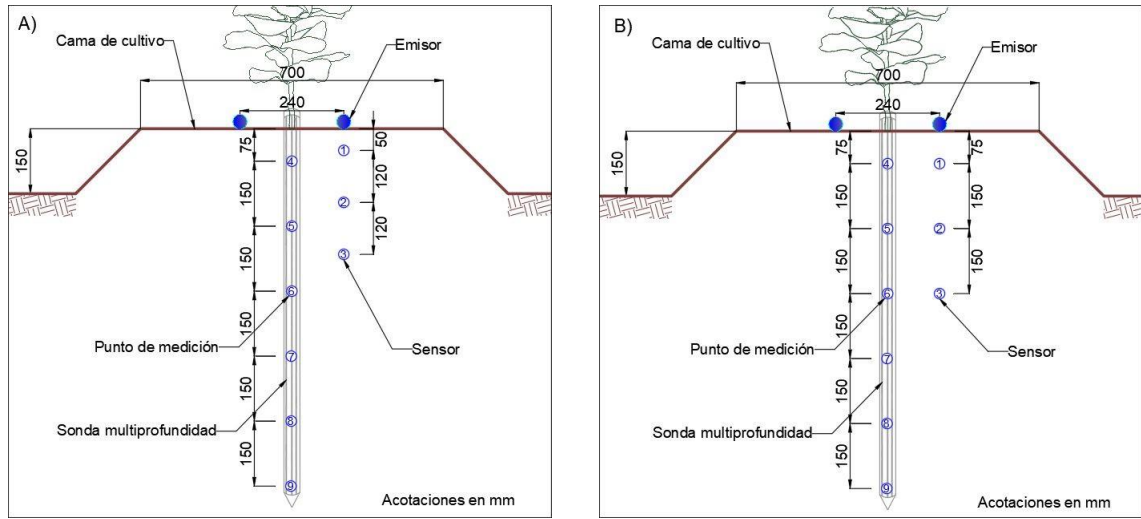


Figura 4.1. Puntos de medición del contenido volumétrico de agua en el suelo con sensores puntuales y sonda multi-profundidad. A) ciclo 2023. B) Ciclo 2024. donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo (mm), I es el volumen de riego aplicado (mm), D es el drenaje profundo (mm) y Δh es el la variación de almacenamiento de agua en el suelo a una profundidad de 0.45 m (mm). El valor de Δh se calculó utilizando la expresión:

$$\Delta h = (\theta\theta_{t0} - \theta\theta_{t1})Z \quad (4.3)$$

donde $\theta\theta_{t0}$ y $\theta\theta_{t1}$ es el contenido volumétrico de agua en el suelo promedio medido por los sensores a las 0:00 horas y a las 23:55 horas respectivamente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Z es la profundidad de muestreo (mm). Los valores de $\theta\theta$ promediado espacialmente se calcularon utilizando las expresiones(3.4 y(3.5 para el ciclo 2023 y 2024 respectivamente (Kang et al., 2012; Wang et al., 2021):

$$\theta\theta = \frac{132\theta\theta_1 + 144\theta\theta_2 + 144\theta\theta_3 + 180\theta\theta_4 + 180\theta\theta_5 + 180\theta\theta_6 + 132\theta\theta_{1'} + 144\theta\theta_{2'} + 144\theta\theta_{3'}}{1380} \quad (4.4)$$

$$\theta\theta = \frac{180\theta\theta_1 + 180\theta\theta_2 + 180\theta\theta_3 + 180\theta\theta_4 + 180\theta\theta_5 + 180\theta\theta_6 + 180\theta\theta_{1'} + 180\theta\theta_{2'} + 180\theta\theta_{3'}}{1620} \quad (4.5)$$

donde $\theta\theta_1, \dots, \theta\theta_6$ son el contenido volumétrico de agua en el suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) medido por los sensores en las diferentes ubicaciones (Figura 4.1) y los coeficientes

corresponden al área de influencia de cada uno de los sensores como se muestra en la Figura 4.2.

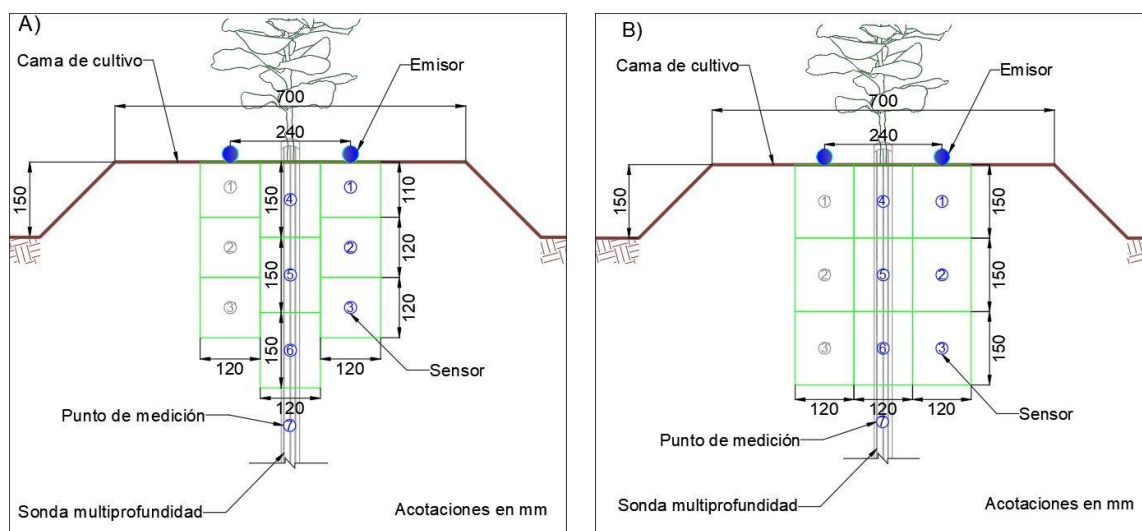


Figura 4.2. Área de influencia de los puntos de medición para el cálculo de D A) Ciclo 2023. B) Ciclo 2024.

Los valores de drenaje profundo (D) se obtuvieron a partir de la variación del almacenamiento de agua en el suelo en el estrato 0.45 – 0.70 m de profundidad (Figura 4.1). D se calculó con la expresión:

$$D = (\theta\theta_{7max} - \theta\theta_{7t0})Z \quad (4.6)$$

donde $\theta\theta_{7max}$ y $\theta\theta_{7t0}$ corresponden a las lecturas en el punto de medición siete (Figura 4.1) del contenido volumétrico de agua en el suelo máxima y la lectura a las 0:00 horas respectivamente ($m^3 m^{-3}$). Z es el espesor del estrato (mm).

4.4.6 Medición del rendimiento del cultivo

En ambos experimentos se realizó la medición del rendimiento comercial del cultivo, para ello se seleccionaron de manera aleatoria ocho plantas y se midió el peso de frutos cosechados en cada uno de los 16 tallos. La cosecha se realizó semanalmente a partir del día 97 DDT para el ciclo 2023 y 90 DDT para el ciclo 2024. Los frutos cosechados se pesaron en una báscula digital marca Torrey modelo L-PCR-40 con una resolución de 0.005 kg.

4.4.7 Descripción del modelo HortSyst

HortSyst es un modelo de crecimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) para sistemas hidropónicos en invernadero. El modelo asume que el cultivo es manejado con prácticas culturales comunes en invernaderos comerciales, el cultivo se encuentra libre de plagas y enfermedades y en especial que el cultivo no presenta limitación alguna de agua y nutrientes (Martinez-Ruiz et al., 2019).

El modelo HortSyst simula la dinámica del tiempo fototérmico (PTI), la producción total de materia seca (DMP), la absorción de nitrógeno (N_{up}), la absorción de fósforo (P_{up}), la absorción de potasio (K_{up}), la absorción de calcio (Ca_{up}) y la absorción de magnesio (Mg_{up}) como variables de estado, como variables de salida el modelo estima el índice de área foliar (LAI) y la evapotranspiración (ETc); las variables de entrada del modelo son valores horarios de la temperatura del aire (T_a , °C), la humedad relativa (HR, %) y la radiación solar global (R_g , $W m^{-2}$), variables que pueden ser medidas fácilmente dentro de un invernadero (Martinez-Ruiz et al., 2019; Martinez-Ruiz, Pineda-Pineda, et al., 2020). En el Cuadro 4.3 se presentan los parámetros del modelo utilizados para las simulaciones, los cuales fueron obtenidos por Roblero (2022) con datos de un sistema de producción de tomate en hidroponía.

En el modelo HortSyst se ha modificado la forma de estimar el índice de área foliar (LAI) para que pueda emplearse en condiciones de campo a cielo abierto o en cultivo en suelo, de este modo LAI se obtiene como (Roblero, 2022):

$$LAI_{jj+1} = LA_{jj} * d \quad (4.7)$$

$$LA_{jj} = p5 * \exp(-\exp(p6 - (p7 * TT_{jj+1}))) \quad (4.8)$$

donde LAI_{jj+1} es el índice de área foliar del día $jj + 1$ siguiente, d es la densidad de plantación, LA_{jj} es el área foliar en el día j -ésimo, TT_{jj+1} es el tiempo térmico del día $jj + 1$ siguiente, $p5$, $p6$ y $p7$ son parámetros del modelo. El tiempo térmico se estima aplicando la función beta (Zhou & Wang, 2018):

$$T_{i+1} = \begin{cases} 0; & T_{a,i+1} < T_b \\ \frac{(T_{a,i+1} - T_b)}{(T_o - T_b)} \frac{(T_u - T_{a,i+1})^{\frac{(T_u - T_o)}{(T_u - T_b)}}}{(T_u - T_o)} (T_o - T_b); & T_b \leq T_{a,i+1} \leq T_u \\ 0; & T_u < T_{a,i+1} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$T_{jj+1} = \frac{\sum_{i=1}^{24} TT_{i+1}}{24} \quad (4.10)$$

donde TT_{i+1} representa el tiempo térmico en la hora $i + 1$, $T_{a,i+1}$ es la temperatura del aire en la hora $i + 1$, T_b es la temperatura base con un valor de 10 °C, T_o es la temperatura optima inferior de 24°C y T_u es la temperatura optima superior de 35 °C.

Cuadro 4.3. Parámetros del modelo de crecimiento HortSyst.

Variable de salida	Parámetro	Valor
LAI (m ² m ⁻²)	P5	2.691
	P6	1.899
	P7	0.003
DMP (g m ⁻²)	RUE	2.891
	DMP _{ini}	0.245
ETc (kg m ⁻²)	A	0.560
	Bd	15.690
	Bn	16.510
Absorción nutrimental		
N _{up} (g m ⁻²)	a	3.362
	b	-0.056
P _{up}	a1	0.816
	b1	-0.020
K _{up}	a2	1.286
	b2	0.189
Ca _{up}	a3	2.962
	b3	-0.303
Mg _{up}	a4	2.952
	b4	-0.327

La ETc es calculada a nivel horario mediante la ecuación de Baille la cual requiere valores de Rg, el déficit de presión de vapor (DPV) y LAI, la ETc se estima como (Martinez-Ruiz et al., 2019):

$$ETc_{(i)} = A \times (1 - \exp(-k LAI_{(jj)})) \times Rg_{(i)} + LAI_{(jj)} DPV_i B_{(d,n)} \quad (4.11)$$

$$ETc_{(jj+1)} = \sum_{i=1}^{24} ETc_{(i)} \quad (4.12)$$

donde $ETc_{(jj+1)}$ es la ETc acumulada diaria ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$), $ETc_{(i)}$ es la ETc horaria ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$), A se refiere al parámetro radiativo (adimensional), B_d y B_n son los parámetros del término aerodinámico para el día y la noche respectivamente ($\text{W m}^{-2} \text{kPa}^{-1}$).

4.4.8 Evaluación del desempeño del modelo

Para juzgar el desempeño del modelo se utilizó el coeficiente de determinación (r^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Los parámetros r^2 , $RMSE$ y NSE fueron calculados usando las siguientes ecuaciones (Moriasi et al., 2007):

$$r^2 = \frac{(N \sum_{i=1}^N S_i O_i - \sum_{i=1}^N S_i \sum_{i=1}^N O_i)^2}{(N \sum_{i=1}^N S_i^2 - (\sum_{i=1}^N S_i)^2)(N \sum_{i=1}^N O_i^2 - (\sum_{i=1}^N O_i)^2)} \quad (4.13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (4.14)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i)^2} \quad (4.15)$$

Donde O_i y S_i son los i -ésimos valores de humedad en el suelo observados experimentalmente y simulados con HortSyst, respectivamente, y N es el número total de datos.

Para valorar el desempeño de la modelación, según los valores de NSE, se usó el criterio de Ritter & Muñoz-Carpena, (2013) quienes sugiere: insatisfactorio ($NSE < 0.65$), aceptable ($0.65 \leq NSE < 0.80$), bueno ($0.80 \leq NSE < 0.90$) y excelente ($NSE > 0.90$).

4.5 Resultados y discusión

4.5.1 Clima dentro del invernadero

La variación de las variables de entrada T_a , HR y R_g medidas dentro del invernadero para los ciclos de cultivo 2023 y 2024 se muestran en Figura 4.3. Durante el ciclo 2023 la T_a máxima, mínima y promedio diario alcanzada dentro del invernadero fueron de 40.9 °C, 1.2 °C y 19.4 °C respectivamente, mientras que para el ciclo 2024 fue de 45.8 °C, 2.7 °C y 20.1 °C (Figura 4.3A). Durante el ciclo 2023 la T_a promedio vario entre 13.8 °C y 23.6 °C con una ligera disminución hacia el final del ciclo. En el ciclo 2024 la T_a promedio vario entre 13.7°C y 26.8 °C siendo más alta al inicio del ciclo y descendió ligeramente durante el ciclo.

La HR presento un comportamiento creciente durante ambos ciclos de cultivo, al inicio del ciclo se presentaron valores bajos con un aumento considerable a partir del día 60 DDT. En el ciclo 2023 la HR máxima, mínima y promedio diaria fue de 98%, 12.0 % y 69% respectivamente, mientras que para el ciclo 2024 fue de 100%, 13.7% y 75.5%. En general en el ciclo 2024 se registraron valores mayores de HR con respecto al ciclo 2023 (Figura 4.3B).

La R_g promedio diaria presento un comportamiento similar durante los dos ciclos de cultivo, sin embargo, en el ciclo 2024 se presentaron valores de R_g máxima más altos durante los primero 30 DDT con respecto al ciclo 2023. La radiación instantánea máxima durante el ciclo 2023 y 2024 fue de 1 034.0 W m⁻² y 958.0 W m⁻² respectivamente. La radiación instantánea promedio vario entre 40.7 y 224.4 W m⁻² para el ciclo 2023 mientras que para el ciclo 2024 vario entre 40.5 W m⁻² y 215.1 W m⁻² (Figura 4.3C).

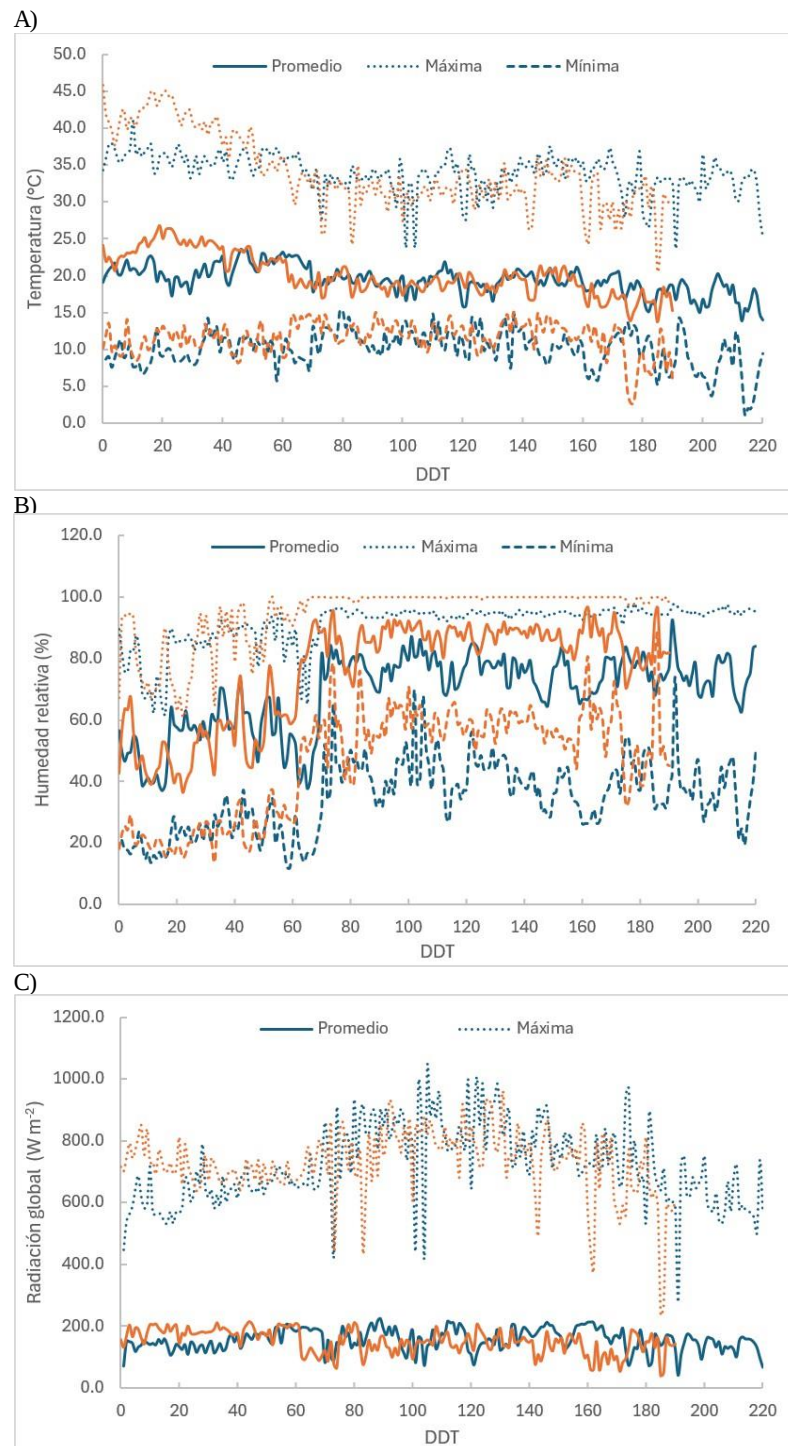


Figura 4.3. Comportamiento de las variables de entrada del modelo HortSys medidas dentro del invernadero a lo largo de los ciclos de cultivo A) Temperatura del aire (T_a), B) Humedad relativa (HR), C) Radiación global (R_g). Las líneas azules corresponden a los valores medidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores medido durante el ciclo 2024.

4.5.2 Evapotranspiración del cultivo

La duración del periodo de crecimiento para el ciclo 2023 fue de 220 días mientras que para el ciclo 2024 fue de 190 días. Los valores de los componentes del balance hídrico y la ETc se presentan en el Cuadro 4.4. Durante el ciclo 2023 se aplicó una lámina de riego mayor con respecto al ciclo 2024, además se observó un menor almacenamiento de agua de riego en el estrato 0.0 – 0.45 m durante el ciclo 2023, ambas condiciones propiciaron que se perdiera una mayor cantidad de agua de riego por drenaje profundo.

Cuadro 4.4. Componentes del balance hídrico del cultivo de tomate de los ciclos de cultivo 2023 y 2024.

Ciclo	Periodo de crecimiento (días)	I (mm)	Δh (mm)	D (mm)	ETc (mm)
2023	220	1432.10	-13.5	68.40	1356.69
2024	190	1227.17	-19.8	50.1	1168.26

Los valores de ETc acumulada obtenidas mediante balance hídrico a lo largo de ciclo de cultivo 2023 fueron de 1 356.69 mm y para el ciclo 2024 de 1 168.26 mm. Baştuğ et al. (2024) reportan valores de ETc acumulada, obtenidas mediante balance hídrico en lisímetros de drenaje con suelo, de entre 371.3 mm y 529.3 mm para ciclos de cultivo en otoño de 126 días y en primavera de 137 días respectivamente. Por su parte Gallardo et al. (2014) para un ciclo de 120 días obtuvieron valores de ETc de 250 mm para cultivo de tomate en sistemas hidropónicos. Ruelas et al. (2022) determinaron ETc acumulado en un sistema hidropónico de 351,9 mm, 388.5 mm y 433.9 mm para un ciclo de cultivo de 154 días y plantas a uno, dos y tres tallos respectivamente. La diferencia en los valores de ETc en los estudios pude atribuirse a diferentes factores como a diferencias en los sitios de experimentación, diferentes tipos de invernaderos, diferente periodo de crecimiento, diferente ciclo de cultivo (primavera-verano u otoño-invierno), factores que modifican el clima dentro del invernadero afectando la ETc (Aslan et al., 2024).

En la Figura 4.4 se muestran los valores de ETc diarios durante los ciclos 2023 y 2024 obtenidos mediante balance hídrico, durante el ciclo 2023 la ETc promedio diaria fue de 6.14 mm día⁻¹ mientras que para el ciclo 2024 fue de 6.12 mm día⁻¹. Los valores de ETc diaria obtenido en la presente investigación son mayores a los encontrados por Aslan et al., (2024) quienes reportan valores de ETc promedio diaria de entre 2.48 mm día⁻¹ y 4.35 mm día⁻¹, sin embargo, Baştuğ et al. (2024) reporta un valor de ETc diaria de 8.0 mm día⁻¹.

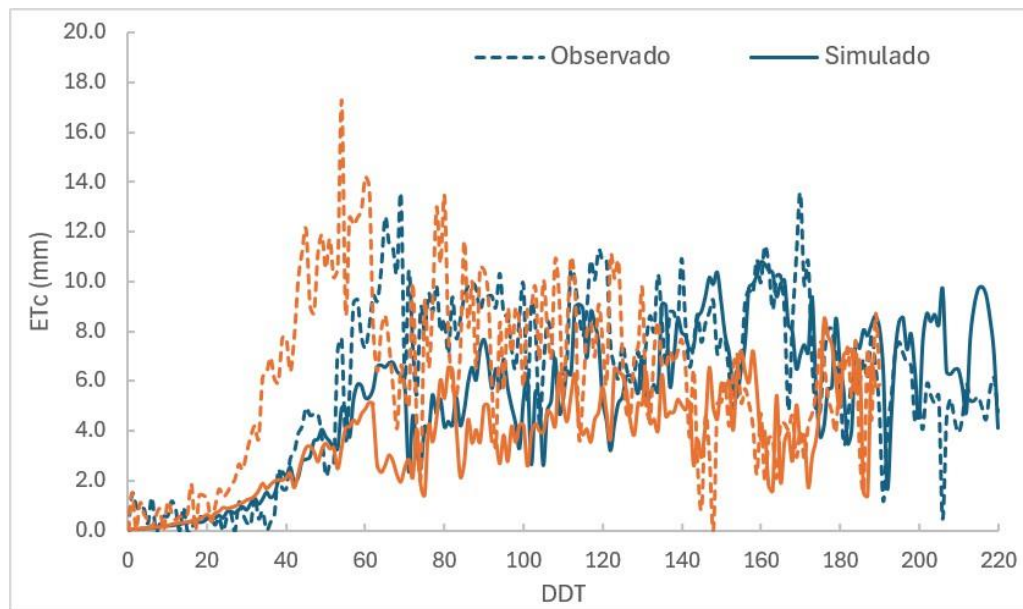


Figura 4.4. Valores diarios de la evapotranspiración del cultivo (ETc) observado y simulado con el modelo HortSyst durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Las líneas azules corresponden a los valores obtenidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores obtenidos durante el ciclo 2024.

La ETc máxima del ciclo 2023 fue de 13.55 mm día⁻¹ y de 17.27 mm día⁻¹ para el ciclo 2024, dichos valores se presentaron en el día 69 y 54 DDT donde se presentan valores de Ta y Rg altas y baja HR (Figura 4.3), además de plantas en pleno desarrollo vegetativo, condiciones que favorecieron el aumento de la ETc, tal como describe Aslan et al. (2024) quien observó un aumento en ETc con el aumento del crecimiento de las plantas de tomate y un aumento de los valores de radiación, además añade que la transpiración del cultivo se ve muy afectada por las condiciones climáticas dentro del invernadero y que la ETc está estrechamente correlacionada con la radiación solar, el DPV y la Ta toda vez que

se presenten condiciones de humedad del suelo adecuadas.

4.5.3 Desempeño del modelo

Los valores simulado por HortSyst de ETc acumulada a lo largo del ciclo de cultivo 2023 fueron de 1 171.98 mm y para el ciclo 2024 de 631.38 mm (Figura 4.5). La ETc media fue de 5.39 mm día⁻¹ y 3.57 mm día⁻¹ para el ciclo 2023 y 2024, respectivamente, mientras que la ETc máxima fue 10.76 mm día⁻¹ y 8.46 mm día⁻¹. En el Cuadro 4.5 presenta los resultados de los parámetros estadístico para ETc y rendimiento de cultivo observados y simulados con HortSyst.

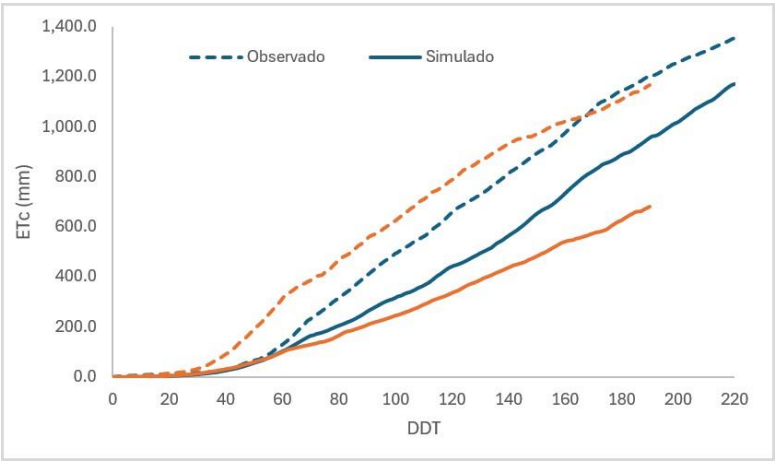


Figura 4.5. Evapotranspiración acumulada del cultivo (ETc) observada y simulada con HortSyst a lo largo de los ciclos 2023 y 2024. Las líneas azules corresponden a los valores obtenidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores obtenido durante el ciclo 2024.

Cuadro 4.5. Desempeño del modelo HortSyst para las variables ETc y rendimiento de los ciclos de cultivo 2023 y 2024.

Variable	Ciclo de cultivo	r ²	RMSE	NSE	Desempeño
Evapotranspiración del cultivo (ETc)	2023	0.987	178.219 (mm)	0.852	Bueno
	2024	0.961	355.481 (mm)	0.183	Insatisfactorio
Rendimiento del cultivo	2023	0.924	6.886 (kg m ⁻²)	0.687	Aceptable
	2024	0.875	7.281 (kg m ⁻²)	0.275	Insatisfactorio

Para el ciclo 2023 el modelo estimó la ETc de manera adecuada hasta el día 60

DDT a partir del cual los valores simulados de ET_c se apartan de los observados, sin embargo, los valores simulados siguen la misma tendencia de los observados. Para el ciclo 2024, los valores simulados con HortSyst se alejan de manera considerable de los observados a partir del día 30 DDT, coincidiendo con valores de ET_c observados diarios que se incrementan rápidamente a partir del día 30 DDT hasta el día 60 DDT (Figura 4.4), durante este periodo se presentaron los valores de T_a máximas mayores a los 35 °C, valores de HR bajos entre 40% y 60% y R_g entre 600 y 800 W m⁻² (Figura 4.3A). Adicionalmente a partir del día 80 DDT y hasta el final del ciclo de cultivo se presentaron valores de HR promedio mayores a 80% y una disminución constante de la R_g que redujeron el DPV y afectaron directamente ET_c. Este comportamiento concuerda con los reportado por Martínez-Ruiz et al. (2019) durante el ciclo de cultivo Otoño – Invierno de 2015 reporta que el modelo HortSyst subestima la ET_c durante los primeros 50 DDT y posteriormente sobreestima la ET_c atribuyendo esta variación a altos valores de HR que variaron entre 60.59% y 93.98% y a una disminución de la R_g y concluyeron que es necesario realizar más investigación para predicciones cuando los niveles de radiación son bajos y la HR alta.

El rendimiento del cultivo simulado por HortSyst a lo largo del ciclo de cultivo fue de 42.03 kg m⁻² y 30.94 kg m⁻² para el ciclo 2023 y 2024, mientras que los valores observados fueron de 36.05 kg m⁻² y 22.64 kg m⁻² (Figura 4.6). Los parámetros estadísticos (Cuadro 4.5) muestra que el ajuste del modelo para la variable rendimiento fue aceptable para el ciclo 2023, sin embargo, para el ciclo 2024 el ajuste fue insatisfactorio. Una parte del bajo ajuste que presentó HortSyst en la simulación del rendimiento es explicada por el desplazamiento del inicio de la producción de frutos, mientras que HortSyst estima el inicio de la producción a partir del día 60 DDT, en los experimentos el inicio de la cosecha de frutos comerciales fue a partir del día 90 DDT (Figura 4.6), esto puede deberse a que el modelo HortSyst estima el rendimiento del cultivo a partir de la producción de materia seca (DMP) que considera la producción total de biomasa de todos los órganos de la planta (Martínez-Ruiz et al., 2019), en este sentido HortSyst estima rendimiento del cultivo a partir del inicio de fructificación y no solo el rendimiento

comercial como se realizó en el presente trabajo. Por otra parte, durante el ciclo 2024 el amarre de fruto en el experimento se vio afectado por temperaturas mayores a 35 °C presentadas a partir del día 20 DDT y hasta el día 50 DDT que coincidió con el inicio de la floración del primer y segundo racimo hecho que disminuyó el rendimiento del cultivo y el ajuste del modelo.

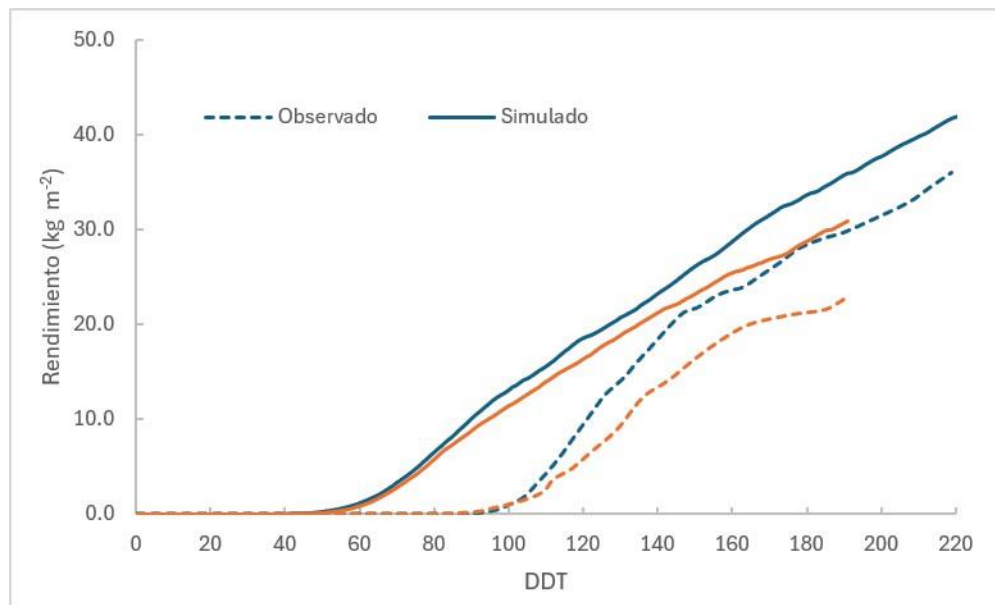


Figura 4.6. Evolución temporal del rendimiento observado y simulado con HortSyst durante el ciclo de cultivo 2023 y 2024. Las líneas azules corresponden a los valores obtenidos durante el ciclo 2023, el color anaranjado corresponde a los valores obtenidos durante el ciclo 2024.

Otro aspecto que puede explicar el bajo ajuste de modelo HortSyst durante el ciclo 2024 son los valores de HR mayores a 80% y Rg menores comparados al ciclo 2023 presentados a partir del día 80 DDT. Un comportamiento similar fue observado por Baştuğ et al. (2024) que reporta rendimientos más bajos durante el ciclo otoño-invierno donde la Ta y Rg disminuyen continuamente hasta el fin de la temporada. En este sentido, Arellano García et al. (2011) menciona que mayor temperatura y mayor humedad relativa generan diferencias en los rendimientos de fruto de cultivo. Es importante mencionar que, el modelo HortSyst estima el rendimiento del cultivo a partir de DMP que a su vez se calcula con la eficiencia del uso de la radiación (RUE) y la radiación fotosintéticamente activa de (PAR) y no considera variables como la humedad relativa y Ta (Martínez-Ruiz

et al., 2019), además Martínez-Ruiz et al. (2021) señalan que el modelo HortSyst no considera ningún tipo de estrés del cultivo, de este modo, el modelo HortSyst no estimó el efecto de condiciones micro climáticas extremas dentro del invernadero que afectaron el desarrollo del cultivo.

4.6 Conclusiones

Para un sistema de producción de tomate en invernadero con fertirriego, el ajuste de los valores simulados de evapotranspiración del cultivo (ETc) y rendimiento por el modelo HortSyst es bueno, considerando que los parámetros de ajuste utilizados en las simulaciones fueron calibrados para un sistema de producción hidropónico de tomate en invernadero, lo cual muestra la robustez de HortSyst para su uso en diferentes sistemas de producción.

Si bien los parámetros estadísticos muestran un buen ajuste en las estimaciones de ETc por HortSyst para el sistema de producción estudiado, HortSyst subestima la ETc lo cual se ve agravado por condiciones climáticas dentro del invernadero de alta humedad relativa (HR) y baja radiación global.

Los resultados obtenidos muestran el potencial del modelo HortSyst para predecir la ETc para un sistema de producción de tomate en invernadero con fertirriego y la factibilidad de acoplarlo a un modelo que represente el comportamiento del agua en el suelo.

4.7 Literatura citada

- Abanto-Rodríguez, C., Farias Araújo, W., Cardoso Chagas, P., Silva Siqueira, R. H. da, Alves Chagas, E., Gonçalves Paulichi, M., García de Lima, J. V., Tadashi Sakazaki, R., Lopes Monteiro Neto Luís Felipe, J. L., Maffei Valero, M. Á., Souza Pinho, C. C., & Paes-de Almeida, L. F. (2020). Determination of evapotranspiration and crop coefficient of *Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh for domestication and conservation on uplands. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 26(3), 175–188. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2019.10.020>
- Allen, R. G., Pereira, S. L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Irrigation and Drainage paper 56.

- Arellano García, M. A., Valera Martínez, D. L., Urrestarazu Gavilán, M., Quezada Martín, M. del R., Murguía López, J., & Zermeño González, A. (2011). Ventilación Natural Y Forzada De Invernaderos Tipo Almería Y Su Relación Con El Rendimiento De Tomate. *Terra Latinoamericana*, 29, 379–386. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57322342003>
- Aslan, G. E., Bastug, R., Karaca, C., Kurunc, A., Buyuktas, D., & Navarro, A. (2024). Effects of Saline Irrigation Water Applications on Evapotranspiration Partitioning and Crop Coefficient of Tomato Grown in Mediterranean-Type Greenhouses. *Agronomy*, 14(8), 1771. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081771>
- Baştuğ, R., Büyüктаş, D., Büyüктаş, K., Aydınsakir, K., Onus, A. N., & Karaca, C. (2024). Evapotranspiration and crop coefficients of some vegetable crops grown under greenhouse conditions. *Journal of Water and Climate Change*, 15(7), 3236–3259. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.093>
- Bertsch Hernández, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. Asociación Costarricense de la ciencia del suelo.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Gallardo, M., Thompson, R. B., Giménez, C., Padilla, F. M., & Stöckle, C. O. (2014). Prototype decision support system based on the VegSyst simulation model to calculate crop N and water requirements for tomato under plastic cover. *Irrigation Science*, 32(3), 237–253. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0427-3>
- Gallardo, Marisa, Elia, A., & Thompson, R. B. (2020). Decision support systems and models for aiding irrigation and nutrient management of vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 240(October), 106209. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106209>
- Gohardoust, M. R., Šimůnek, J., Hardelauf, H., & Tuller, M. (2021). Adaptation and validation of the ParSWMS numerical code for simulation of water flow and solute transport in soilless greenhouse substrates. *Journal of Hydrology*, 596(December 2020), 106209. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126053>
- Gu, Z., Qi, Z., Burghate, R., Yuan, S., Jiao, X., & Xu, J. (2020). Irrigation Scheduling Approaches and Applications: A Review. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001464)
- Incrocci, L., Thompson, R. B., Fernandez-Fernandez, M. D., De Pascale, S.,

- Pardossi, A., Stanghellini, C., Roupael, Y., & Gallardo, M. (2020). Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 242, 106393. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106393>
- Juárez-Maldonado, A., De Alba Romenus, K., Zermeño González, A., & Benavides Mendoza, A. (2017). Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 943–954. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i5.589>
- Kang, Y., Wang, R., Wan, S., Hu, W., Jiang, S., & Liu, S. (2012). Effects of different water levels on cotton growth and water use through drip irrigation in an arid region with saline ground water of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 109(September 1997), 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.02.013>
- Katsoulas, N., & Stanghellini, C. (2019). Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy*, 9(7), 392. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070392>
- Li, W., Awais, M., Ru, W., Shi, W., Ajmal, M., Uddin, S., & Liu, C. (2020). Review of Sensor Network-Based Irrigation Systems Using IoT and Remote Sensing. *Advances in Meteorology*, 2020, 8396164. <https://doi.org/10.1155/2020/8396164>
- Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., & Prado-Hernández, J. V. (2019). HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(1), 89–102. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000100089>
- Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., Sánchez-García, P., & Mendoza-Pérez, C. (2021). Uncertainty analysis of the HORTSYST model applied to fertigated tomatoes cultivated in a hydroponic greenhouse system. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19(3), e0802. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021193-17842>
- Martínez-Ruiz, A., Pineda-Pineda, J., Ruiz-García, A., Prado-Hernández, J. V., López-Cruz, I. L., & Mendoza-Pérez, C. (2020). The HORTSYST model extended to phosphorus uptake prediction for tomatoes in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 1271(1271), 301–306. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1271.41>
- Martínez-Ruiz, A., Sánchez-García, P., Pineda-Pineda, J., Prado-Hernández, J. V., & Ruiz-García, A. (2020). Prediction of nitrogen, phosphorus and potassium uptake using a photothermal model. *Acta Horticulturae*, 1296(1296), 469–476. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.61>

- Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Roblero Angel, E. B. (2022). *Caracterización fisiologica y nutrimental de jitomate en invernadero utilizando el modelo de crecimiento HortSyst (Tesis Maestría)* [Colegio de Postgraduados]. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/4895>
- Ruelas-Islas, J. D. R., Rubiños-Panta, J. E., Peinado-Fuentes, L. A., Mendoza-Pérez, C., Martínez-Ruiz, A., & Escobosa-García, I. (2022). Consumo de agua de tomate en invernadero en función del número de tallos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 137–147. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3269>
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 304–310. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:4\(304\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304))
- Stanghellini, C. (2014). HORTICULTURAL PRODUCTION IN GREENHOUSES: EFFICIENT USE OF WATER. *Acta Horticulturae*, 1034, 25–32. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1034.1>
- Sun, L., Li, B., Yao, M., Mao, L., Zhao, M., Niu, H., Xu, Z., Wang, T., & Wang, J. (2023). Simulation of Soil Water Movement and Root Uptake under Mulched Drip Irrigation of Greenhouse Tomatoes. *Water*, 15(7), 1282. <https://doi.org/10.3390/w15071282>
- Zhang, J., Xiang, L., Zhu, C., Li, W., Jing, D., Zhang, L., Liu, Y., Li, T., & Li, J. (2023). Evaluating the irrigation schedules of greenhouse tomato by simulating soil water balance under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 283(February), 108323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108323>
- Zhou, G., & Wang, Q. (2018). A new nonlinear method for calculating growing degree days. *Scientific Reports*, 8(1), 10149. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>