

Desarrollo de gemelo digital de suelo agrícola mediante Hydrus-Matlab

Padilla, G.^a, Reales, F.^{b,*}, Orihuela, L.^{b,c}

^a Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, 21007, Huelva, España.

^b Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad, Universidad de Huelva, 21819, Huelva, España.

^c Departamento de Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva, 21007, Huelva, España

To cite this article: Padilla, G., Reales, F., Orihuela, L. 2025. Development of a Digital Twin for Agricultural Soil Using Hydrus-Matlab. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain), 2025.

Resumen

Este documento presenta un trabajo en curso sobre el desarrollo de un gemelo digital para suelo agrícola. El gemelo digital se basa en la interacción entre Hydrus, que es la herramienta de referencia para la simulación de humedad y temperatura en suelos no saturados, y Matlab, que facilita una interfaz automatizada con el experimento. La interconexión Hydrus-Matlab está desarrollada casi en su totalidad. El experimento agrícola para la validación del gemelo está en proceso de montaje y aún no se disponen de datos reales para evaluar el rendimiento del gemelo.

Palabras clave: Gemelo digital, Suelo agrícola, Modelado espacio-temporal, Calibración con datos, Control para agricultura.

Development of a Digital Twin for Agricultural Soil Using Hydrus-Matlab

Abstract

This document presents an ongoing work on the development of a digital twin for agricultural soil. The digital twin is based on the interaction between Hydrus— the reference tool for simulating moisture and temperature dynamics in unsaturated soils— and Matlab, which provides an automated interface with the experiment. The Hydrus-Matlab interconnection is almost fully developed. The agricultural experiment for the twin's validation is currently being set up, and no real data is yet available to assess the twin's performance.

Keywords: Digital twin, Agricultural soil, Spatio-temporal modeling, Data-based calibration, Control in Agriculture.

1. Introducción

El consumo de agua a nivel mundial ha aumentado un 1 % anual en los últimos 40 años y se prevé que continúe a ese ritmo hasta 2050 (United Nations, 2023), intensificando una crisis hídrica global cada vez más preocupante. En este contexto, es necesario mejorar la captación, el almacenamiento y la reutilización del agua, y también actuar sobre los sectores que ejercen mayor presión sobre el recurso. La agricultura, responsable de cerca del 70 % del uso de agua dulce a nivel mundial (FAO, 2020), es un área prioritaria de intervención. Promover un uso eficiente e informado del riego es, por tanto, esencial, y para ello resulta clave conocer la dinámica espacial y temporal del agua en el suelo.

Entre las muchas herramientas que pueden contribuir al manejo eficiente del agua, resulta útil disponer de un modelo

dinámico de humedad en el suelo. Este tipo de modelo permite comprender y predecir cómo cambia el contenido de agua en el perfil del suelo con el tiempo y el espacio, lo que ayuda al acierto en la toma de decisiones en el riego, y así optimizar este recurso.

El modelo más empleado para capturar esta dinámica espacio-temporal es conocido como ecuación de Richards (Richards, 1931). Este modelo está descrito como una ecuación en derivadas parciales que se acopla con la ecuación del calor, pues la temperatura es un parámetro clave en el comportamiento dinámico. La herramienta más usada para resolver estas ecuaciones y simular la humedad en el suelo es HYDRUS. Previa determinación del modelo de suelo, condiciones iniciales y de contorno, HYDRUS simula el movimiento del agua en el suelo (Simunek *et al.*, 2022). HYDRUS aporta también herramientas de optimización para

*Autor para correspondencia: francisca.viejo@diesia.uhu.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

estimar los parámetros del modelo del suelo a partir de datos experimentales.

Sin embargo, el suelo agrícola está en constante cambio, por procesos físicos y biológicos. Y, por tanto, el modelo debe actualizarse periódicamente. Es aquí cuando el uso de un gemelo digital resulta clave. Chicaiza *et al.*, (2024) han analizado cómo ha evolucionado el concepto de gemelo digital a lo largo del tiempo y cómo ha sido utilizado en diferentes contextos. Al existir un flujo de datos entre el mundo físico y el gemelo, el modelo del suelo se mantiene actualizado. El uso de gemelos digitales en el ámbito agrícola es una aplicación novedosa y aún poco explorada, lo que lo convierte en un campo de investigación innovador y con gran potencial de desarrollo. Resulta particularmente interesante por la variabilidad que este sector tiene, y lo compleja que resulta la experimentación.

2. Estructura de la plataforma del gemelo digital

El gemelo digital que se va a implementar tiene la estructura que se ilustra en la Figura 1. El objetivo será el de mantener, en el entorno virtual, un modelo fidedigno y actualizado del comportamiento de la dinámica del suelo agrícola. Existen diferentes modelos físico-químicos de suelos agrícolas, así que el usuario debe seleccionar alguno de los que tiene implementado Hydrus (Simunek *et al.*, 2022), según le interese profundizar en unas características u otras.

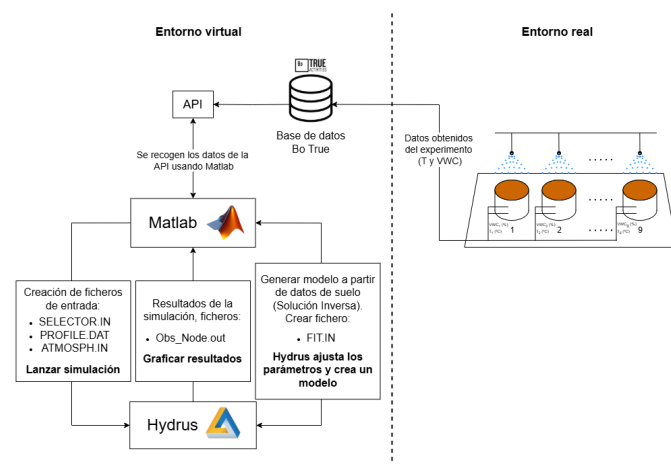


Figura 1: Estructura de la plataforma del gemelo digital.

2.1. Entorno real

El entorno real está constituido por el propio suelo, contenido en 9 macetas cilíndricas de 38 cm de diámetro por 40 cm de altura, regado desde una tubería colgada por encima de las macetas. Para poder mantener el gemelo digital actualizado, se medirán las siguientes variables:

- Temperatura (°C) y contenido volumétrico de agua (%) a diferentes profundidades.
- Volumen de agua aportado mediante el riego.

Para la medición de temperatura y contenido volumétrico de agua (VWC, por sus siglas en inglés), se han instalado equipos de instrumentación del fabricante BoTrue¹, que emplean tecnologías de comunicación LoRa, muy adecuadas para agricultura por su elevado alcance y reducido consumo. La frecuencia de muestreo, que puede ajustarse, debe ser conocida por el gemelo digital.

2.2. Entorno virtual

Los datos del entorno real son almacenados en una base de datos propietaria del fabricante, y son accesibles por el gemelo digital a través de una API en tiempo real.

El gemelo digital se basa en la interrelación de dos paquetes software, Matlab e Hydrus, cuyas funciones se detallan a continuación:

- Matlab: acceso a datos experimentales, pretratamiento de datos, generación de ficheros para la comunicación con Hydrus (ver Figura 1), visualización de datos, y obtención de métrica para lanzar una nueva calibración.
- Hydrus: simulación espacio-temporal del proceso, y calibración del modelo, ajustando los parámetros del suelo del modelo a los nuevos datos experimentales.

3. Lógica del modelo digital

El gemelo digital ejecuta la lógica que se ilustra en el diagrama de la Figura 2. Se parte de un modelo de suelo y unos parámetros iniciales que, bien pueden ser los que vienen por defecto en Hydrus, bien unos definidos por el usuario, o bien identificados con un primer conjunto de datos.

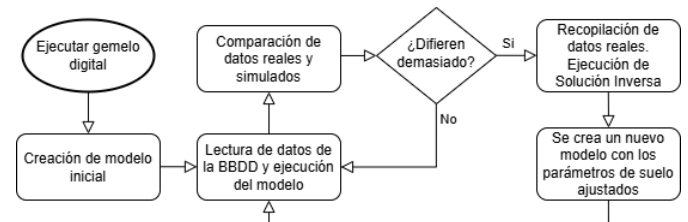


Figura 2: Diagrama de flujo de la lógica del gemelo digital.

Seguidamente, el gemelo evalúa la capacidad del modelo para predecir los datos experimentales que se están midiendo y que son accesibles a través de la API. Así, empleando una métrica asociada al error de predicción, se concluye si el modelo está bien o mal calibrado.

Cuando el modelo realiza predicciones que difieren de los datos experimentales, se lanza una recalibración de los parámetros del modelo. Esta recalibración se basa en resolver lo que Hydrus denomina el “problema inverso”, que no es más que un problema de optimización para el ajuste de los parámetros del modelo.

¹ Más información acerca de BoTrue en: <https://botrueactivities.com/>

Este proceso se ejecuta de forma automática gracias a los ficheros de comunicación entre Matlab-Hydrus (ver Figura 1). Los más interesantes se detallan a continuación:

- **(Matlab -> Hydrus) SELECTOR.IN:** elige el tipo de simulación de suelo a realizar y establece los parámetros de simulación.
- **(Matlab -> Hydrus) PROFILE.DAT:** define, entre otros, el perfil del suelo a simular, las posiciones y tiempos en los que se van a predecir humedad y temperatura, los materiales y las subregiones en las que está dividido dicho perfil.
- **(Matlab -> Hydrus) ATMOSP.H:** permite añadir registros de datos atmosféricos.
- **(Hydrus -> Matlab) OBS_NODE.OUT:** valores de humedad y temperatura predichos por el modelo en las posiciones y tiempos definidos en *PROFILE.DAT*.
- **(Matlab -> Hydrus) FIT.IN:** introduce datos experimentales, conjunto de parámetros a calibrar y valores estimados de estos.
- **(Hydrus -> Matlab) FIT.OUT:** valores de los parámetros del suelo tras la calibración con *FIT.IN*.

4. Estado de desarrollo

4.1. Desarrollo de la plataforma

En cuanto al *entorno real*, el experimento consta de 3 ensayos con 3 repeticiones (ver Figura 3). Cada ensayo está sometido a diferente riego, con nebulizadores de 5, 10 y 15 L/h. Los sensores, aún por instalar, se situarán a dos profundidades diferentes.



Figura 3: Montaje del diseño experimental.

En cuanto al *entorno virtual*, la API está operativa, y la interconexión automática Hydrus-Matlab está casi completa, a falta de la automatización de la generación de eventos de calibración y de la generación de funciones de preprocesamiento de datos experimentales para su uso posterior por el gemelo.

A modo de ilustración, la Figura 4 presenta una de las capacidades de visualización del gemelo, que permite generar representaciones de la evolución de las variables frente al tiempo y/o espacio.

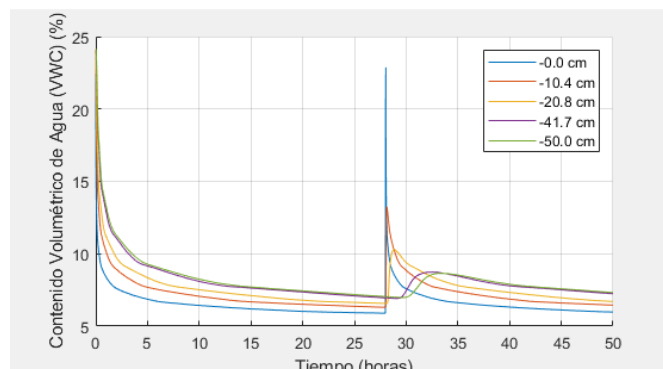


Figura 4: Evolución de la humedad en 5 nodos de observación a distintas profundidades.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Aunque el gemelo está aún en fase de desarrollo, comienza a ser de utilidad para el mantenimiento de un modelo actualizado del suelo. Una vez operativo, se podrán lanzar campañas experimentales para tratar de optimizar el riego, que será uno de sus impactos clave. Como trabajo futuro, convendría modelar la absorción de la planta, para tener modelos de explotaciones agrícolas en producción.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto RYC2021-032919-I, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ y por la “Unión Europea NextGenerationEU/PRTR”.

Referencias

- Chicaiza, W. D., Gómez, J., Sánchez, A. J., y Escaño, J. M. (2024). El Gemelo Digital y su aplicación en la Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 21(2), 91-115.
- FAO, 2020. The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- United Nations, The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. UNESCO, Paris
- Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1(5), 318–333. DOI: 10.1063/1.1745010.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Brunetti, G., van Genuchten, M.Th., 2025. *HYDRUS 1D: Technical Manual (Version 5.05)– The HYDRUS Software Package for Simulating the One-, Two-, and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media*. PC-Progress, Prague, Czech Republic.

¹ Más información acerca de BoTrue en: <https://botrueactivities.com/>