

Calibración del sensor Watermark 200SS y Tensiómetro para programación de riego, Caso de estudio: Textura arenosa

Luis Jesus Galdeano Lara¹; Cruz Octavio Robles Rovelo²; David Vargas Cano³ Miguel Servin Palestina^{4*}

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Licenciatura en Agronomía, San Juan Acateno, Avenida Universidad, Teziutlán, 73965 Pue, México.

²Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Circuito Marie Curie S/N, Parque de Ciencia y Tecnología QUANTUM Ciudad del Conocimiento, 98160 Zacatecas, Zacatecas, México.

³Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, CP 56230, Chapingo, Estado de México, México.

⁴Campo experimental Zacatecas INIFAP, Ingeniería de riego, kilómetro 24.5, Zacatecas - Fresnillo, 98500 Zacatecas, México.

servin.miguel@inifap.gob.mx (*Autor de correspondencia)

Resumen

La optimización del riego en suelos requiere una adecuada calibración de los sensores de humedad, principalmente en suelos arenosos los cuales poseen una baja capacidad de retención de agua. Este estudio tuvo como objetivo calibrar y evaluar el rendimiento de los sensores Watermark y tensiómetro agrícola para determinar los rangos óptimos de humedad en un suelo franco arenoso del Rancho "Las Palmas" en Zacatecas, México. Se utilizó el método de ollas de presión para obtener la curva de retención de humedad, ajustada al modelo de van Genuchten. La textura del suelo se caracterizó por un 65.8% de arena, 12.2% de arcilla y 22% de limo, lo que indicó una baja capacidad de retención hídrica. Los límites de humedad obtenidos fueron de 7.46% para la capacidad de campo y 3.12% para el punto de marchitez permanente, con una humedad aprovechable de 4.34%. La calibración de los sensores se realizó mediante modelos exponenciales con ajustes de $R^2 > 0.93$. Se determinó que el riego debe activarse cuando el sensor Watermark mida 14 cbar y detenerse en 10 cbar, mientras que para el tensiómetro los valores fueron de 9.23 a 11.94 cbar. Estos resultados permiten una mejor gestión del riego en suelos arenosos, maximizando la eficiencia del uso del agua y minimizando el riesgo de estrés hídrico en las plantas.

Palabras claves: Sensores de humedad, curva de retención hídrica, eficiencia en el uso del agua

Introducción

El agua, como recurso esencial para la vida en el planeta, enfrenta presiones cada vez mayores debido a la sobreexplotación y el cambio climático. Su papel en la agricultura, que consume alrededor del 70% de toda el agua dulce, y las estimaciones sugieren que podría aumentar hasta el 87% en un futuro próximo (Chaubey & Mani, 2018; Wu et al., 2022), es innegable, pues garantiza la producción de alimentos y el sustento de comunidades rurales y urbanas. Sin embargo, la ineficiencia en la gestión hídrica, la falta de modernización del sector agrícola y una infraestructura inadecuada generan un uso insostenible del agua, poniendo en riesgo la supervivencia de los ecosistemas y la salud humana. Es imperativo adoptar estrategias de gestión sostenibles que prevengan el agotamiento de las aguas subterráneas y la contaminación (Troy et al., 2023), y que aseguren la productividad agrícola y la seguridad alimentaria (Pandya, 2023).

En muchas regiones, el riego por gravedad, una práctica tradicional, sigue siendo utilizado a pesar de su considerable desperdicio de agua debido a la evaporación y el escurrimiento superficial (Dexter, 2004). Los métodos de riego ineficientes, exacerbados por la falta de integración tecnológica, contribuyen significativamente al despilfarro de agua en la agricultura (Kumar & Manjula, 2024). Sin embargo, la adopción de tecnologías como sensores de humedad y tensiómetros ofrece una solución transformadora, permitiendo un monitoreo preciso que optimiza la programación del riego, reduce el desperdicio de recursos y mejora el rendimiento de los cultivos (Paul et al., 2023). Además, la integración de sensores no solo promueve prácticas agrícolas más sostenibles, sino que también mejora la eficiencia del uso del agua y fortalece la resiliencia frente al cambio climático, especialmente en regiones con escasez de agua (Dhyani et al., 2024).

En Zacatecas, se destinan 1.25 millones, para la agricultura, en contra del alrededor de 0.2 millones, que se usan en la industria y el uso urbano, y ante el alza de estos, se espera que los litros destinados a la agricultura disminuyan. Esto nos deja la problemática de satisfacer la producción agrícola, así que surge la solución de implementar técnicas de este modo, garantizando la seguridad alimentaria. Actualmente las programaciones de riego en la mayoría del campo mexicano, no se realizan de una manera óptima, siguiendo el clima, el cultivo, el suelo, fertilización, entre otras, causando por ejemplo una sobre explotación de los mantos acuíferos (Servín, 2024).

Conocer las necesidades de agua en los cultivos resulta fundamental, siendo participe el uso del riego para alcanzar mayores producciones y calidad de cosechas, junto a el ahorro de considerables volúmenes de agua. (IMTA, 1995). Sabiendo que Zacatecas, se sitúa en una región de alto déficit evapotranspirativo, la aplicación de una correcta lámina de riego se hace necesaria para cualquier producción, siendo los cultivos más representativos maíz, chile, y frijol para el estado. (INIFAP, 2012). La tecnificación del riego se centra en responder tres

preguntas fundamentales, ¿cuándo, cuánto y cómo regar los cultivos? Estas interrogantes son clave para lograr la máxima eficiencia y productividad en el uso del agua. En este documento se aborda específicamente la programación del riego basada en un seguimiento detallado de las características del suelo. Para ello, es necesario considerar factores como la profundidad, pedregosidad, textura, estructura, porosidad y permeabilidad. En cuanto a la frecuencia de riego, la profundidad y textura del suelo juegan un rol importante, ya que en suelos más arenosos la frecuencia de riego deberá ser mayor, mientras que, en suelos más arcillosos, la frecuencia deberá ser menor. (CONADI, 2017). El estado del agua en el suelo y presencia de cultivo requieren una energía específica para su extracción hacia la atmósfera, la cual está determinada por el potencial hídrico. Por ello, es indispensable obtener las curvas de retención de humedad del suelo (CRH) a diferentes niveles de tensión. Esta tensión de humedad varía según las condiciones específicas del suelo, el clima y la variedad de cultivo, lo que hace necesario mantener la humedad del suelo en un rango óptimo para el desarrollo de las plantas, evitando el exceso que podría generar problemas. El potencial de rendimiento de los cultivos depende principalmente de la información genética, manejo del agua de riego, aplicación de fertilizantes, control de plagas y enfermedades. En este contexto, uno de los aspectos más importantes para lograr altos rendimientos en cultivos en zonas con problemas de abastecimiento de agua, es el manejo del agua de riego de acuerdo con la fisiología de la planta, evapotranspiración del cultivo o de tensión de humedad del suelo. Entre estos factores, el agua es el que presenta menor costo, es de fácil manejo y tiene una interpretación accesible para los productores agrícolas (Núñez – Ramírez, 2021). Por otra parte, la medición directa de la humedad en el suelo es un proceso laborioso, tedioso y costoso. Por esta razón, se utilizan sensores de humedad del suelo como alternativa, con a pesar de requerir una inversión inicial. Sin embargo, la mayoría de estos sensores requieren una calibración exhaustiva para los suelos donde vayan a ser implementados. El objetivo de este trabajo fue calibrar los sensores Watermark 200SS y tensiómetro para programación de riego en un suelo de textura arenosa, así como establecer los umbrales de óptimos deriego utilizando la curva de retención de humedad ajustada al modelo de van Genuchten.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en condiciones controladas dentro de las instalaciones del CEZAC de INIFAP Calera, ubicado en Zacatecas, México. Se utilizó una muestra compuesta de suelo (Aproximadamente 50 kg) extraída de 10 a 40 cm de profundidad del Rancho “Las Palmas”, ubicado en el municipio de Fresnillo, con ubicación geográfica N 23.377, W -102.878.

De la muestra se determinó textura y la curva de retención de humedad por el método de ollas de presión (Richards, 1948) Además, mediante el protocolo para calibración de sensores de humedad en medios porosos descrito por la universidad Técnica de Múnich, Alemania (Adla, 2019) se estimó la curva de calibración del

sensor Watermark 200ss y del Tensiómetro agrícola Irrrometer modelo SR de punta azul.

Determinación de textura

Para determinar la textura, es decir, la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas de arena (>0.05 mm), limo (0.002 mm) y arcilla (< 0.002 mm) se utilizó el método del decímetro de Bouyoucos (AS-09), descrito en la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000.

Determinación de curva de retención de humedad

La determinación de la curva de retención de humedad por el método del plato y membrana de presión se realizará a través del método de la olla de Richards (AS 06), descrito en la norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000. Para este método se establecieron las siguientes presiones de succión (T) de 0.3, 1.0, 3.0, 5.0, 9.0 y 15.0 atmósferas y se determinó la humedad correspondiente para cada punto con el método gravimétrico y posteriormente se graficó la curva ajustándola con el modelo de regresión no lineal van Genuchten.

$$\%H = \left(\frac{PSH - PSS}{PSS} \right) * 100 \quad (1)$$

donde: %H es el porcentaje de humedad gravimétrico, PSH peso de suelo húmedo (gr) y PSS es el peso del suelo seco (gr).

Posteriormente se graficó la curva de lo anterior ajustando también la humedad a 0.15 atmósferas con el modelo de Van Genuchten (2010) pues fue importante como límite mínimo de la humedad considerando al suelo como un sustrato.

El modelo de van Genuchten con la restricción $m=1-1/n$ y se describe con la siguiente ecuación.

$$\hat{H} = h_r + \frac{h_s - h_r}{(1 - aT^n)^m} \quad (2)$$

donde \hat{H} es el contenido de humedad gravimétrico (g/g) predicha por el modelo; h_s y h_r son la humedad residual y de saturación. respectivamente (g/g); a es un parámetro empírico, T es la tensión (atm) y m es un parámetro de ajuste de la curva.

Calibración de sensores

La calibración del sensor de humedad Watermark y del Tensiómetro (ambos de Irrrometer Company, Inc., Riverside, CA), con el protocolo previamente mencionado. Se utilizó una muestra alterada extraída in situ, eliminando su estructura secundaria. Starr y Paltineanu, (2002) mencionan que al usar suelos alterados para la calibración de humedad es posible obtener una alta precisión. Se optimizó la función objetivo minimizando los parámetros o coeficientes del modelo entre la variable independiente (lectura de los sensores) y dependiente (humedad del suelo) mediante el siguiente procedimiento:

- A) Se colectó una muestra compuesta de 50 kg aproximadamente de suelo, extraído de 10 a 40 de profundidad, in – situ, se tomaron características visuales y coordenadas geográficas.
- B) La muestra fue secada en la sombra hasta peso constante, posteriormente se cribó con una malla de 2 mm. Después se colocaron por cuadruplicado 6 kg de muestra en contenedores fabricados con tubo PVC de 6” de diámetro por 30 cm de altura y se obtuvo la humedad residual por el método gravimétrico. En cada contenedor se colocaron los dos sensores evaluados con una separación de 8 a 10 entre cada sensor, asegurando que ambos estén en las mismas condiciones de humedad
- C) Después, saturamos vía capilaridad y dejamos secar hasta obtener una lectura con el sensor Watermark de “0” cbar y en el tensiómetro: se procedió a retirar el aire dentro del tubo con la bomba del tensiómetro, para dejar la lectura en “0” cbar, se dejó drenar a temperatura ambiente y, finalmente, se procedió a pesar, utilizando una báscula digital de acero inoxidable 10 kg, marca Torrey LEQ-10-N con pesos de suelo húmedo mas tara (PSH+T) cada 24 horas y se estimó el porcentaje de humedad (Ecuación 1).
- D) Finalmente, se relacionaron las lecturas obtenidas del sensor con el porcentaje de humedad buscando el modelo de regresión con mejor ajuste. Para mantener la calidad de predicción de los modelos, se utilizaron las siguientes funciones como medidas de desempeño: 1) raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Heng et al, 2009) y, 2) coeficiente de determinación (R^2), descritas por Wallach et al. (2019).

Resultados y discusión

Textura

Los resultados del análisis dejar ver que hay 65.8% arena, 12.2% arcilla y 22%, limo que corresponde a una textura franco arenosa (Cuadro 1). Lo que indica un gran tamaño de partículas, bajo contenido de partículas finas, lo que limita la capacidad de retención de agua y nutrientes, son suelos con buen drenaje y baja retención de humedad, además, de ser suelos pobres en materia orgánica y nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal

Cuadro 1. Porcentaje de partículas de textura del suelo del rancho las Palmas

ID	Arena	Arcilla	Limo	Textura
Las Palmas	65.8	12.2	22	Franco Arenoso

Curva de retención de humedad

La humedad del suelo fue de 7.46 % y 3.12 % para capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) respectivamente, estos valores indican una humedad aprovechable de 4.34%. El modelo de van Genuchten (RMSE = 0.092, R^2 = 98.5) ha proporcionado una descripción precisa de la retención de humedad en

un suelo franco arenoso (Figura 1). Los parámetros obtenidos indican que este suelo se caracteriza por una baja disponibilidad hídrica, un drenaje rápido y una amplia distribución de tamaños de poro. Estos resultados tienen importantes implicaciones para la gestión sostenible de este tipo de suelos, ya que permiten diseñar estrategias de manejo más eficientes y adaptadas a sus características específicas.

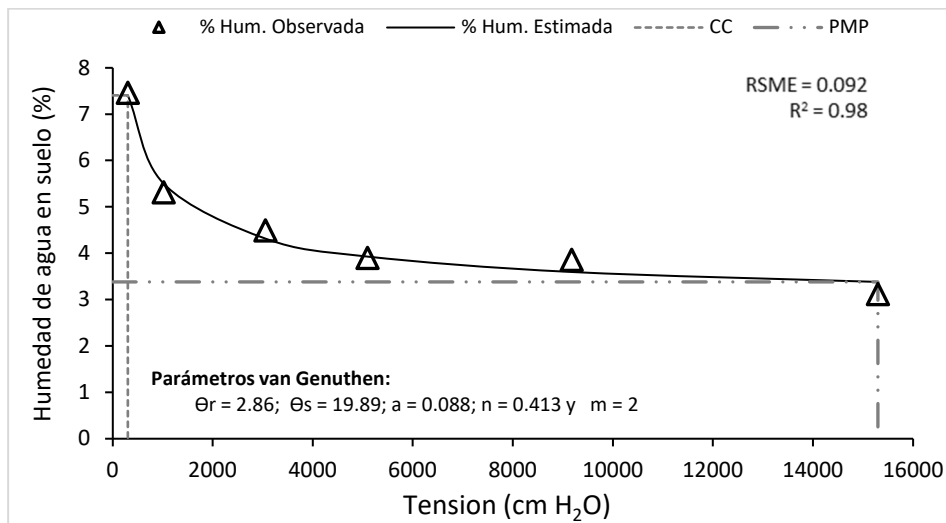


Figura 1. Curva de retención de humedad del suelo y parámetros del modelo de van Genuchten Las Palmas, Frenillo, Zacatecas.

Las plantas en suelos arenosos a menudo desarrollan sistemas radiculares superficiales para absorber rápidamente el agua antes de que se drene (Zhiyong, et al., 2022). Si se permite que el suelo se seque hasta la capacidad de campo, estas raíces pueden no alcanzar el agua disponible y la planta experimentará sequía fisiológica, incluso si hay humedad en el suelo a mayor profundidad. Por esta razón, la tensión recomendada para manejo de riego en suelos arenosos es 100 a 300 cm H₂O. Con esta tensión el modelo predice una humedad de 9.6% y 7.44% como límite superior (L. Superior) y límite inferior (L. Inferior), en este rango se encuentra la humedad adecuada para el crecimiento óptimo de las plantas establecidas en suelo de Las Palmas.

Calibración de sensores

La relación de humedad de suelo, respectivamente a cada implemento, sensor Watermark (WT) y tensiómetro (TE), se ajustó a un modelo exponencial descrito de la siguiente forma:

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} \quad (3)$$

donde y , se trata de la humedad del suelo medida en porcentaje gravimétrico (g/g), siendo x , la lectura de los sensores (Ls; cbar), y a y b coeficientes del modelo que

determinan un proceso por el ajuste de la curva. Dicho modelo propuesto, presentó un excelente ajuste con una $R^2 > .93$ en ambos casos de relación de humedad de suelo con los sensores. (Cuadro 2).

Cuadro 2. Modelos de regresión para estimar la humedad del suelo en función de las lecturas

Sensor	%H Estimada	Ls Estimada	R^2
WT	$y = 17.93e^{-0.063x}$	$x = \frac{1000}{63} \ln \left[\frac{1793}{100y} \right]$	0.93
TE	$y = 22.865e^{-0.094x}$	$x = \frac{1000}{94} \ln \left[\frac{2286.5}{100y} \right]$	0.98

El porcentaje de humedad del suelo, expresado en términos gravimétricos (%H), en función de la lectura del sensor WT y TE, sigue una curva sigmoidea típica en la que se pueden identificar tres fases claras: 1) fase inicial: En suelos arenosos, esta fase se caracteriza por un crecimiento lento debido a la rápida pérdida del agua libre bajo la influencia de la gravedad. El agua drena con facilidad en este tipo de suelo debido a la baja capacidad de retención hídrica y la gran proporción de poros gruesos, lo que resulta en una rápida caída del contenido de humedad, 2) fase de crecimiento exponencial: Aquí, el contenido de humedad aumenta más rápidamente, lo que representa el agua que es fácilmente aprovechada por las plantas. En suelos arenosos, esta fase es relativamente corta, dado que estos suelos tienen una menor capacidad de almacenar grandes cantidades de agua útil. Durante esta etapa, la mayor parte del agua disponible para las plantas es fácilmente extraída, lo que es crucial para el desarrollo óptimo de las mismas y 3) fase final: A medida que la curva se aproxima a su valor máximo, el crecimiento de la humedad se desacelera. En esta fase, el agua restante está fuertemente retenida en los microporos del suelo, pero en suelos arenosos esta cantidad de agua es limitada. Las plantas comienzan a experimentar estrés hídrico, ya que la mayoría del agua restante no es fácilmente accesible para ellas.

Calibración del sensor Watermark

Consideran los valores de humedad del L. Superior y L. Inferior se obtuvo el valor de lectura del sensor (x) al despejar el modelo WT (cuadro 3). El L. Superior y L. Inferior fue de 9.92 ~ 10 cbar y 13.96 ~ 14 cbar respectivamente. Es decir, se debe regar cuando el sensor mida 14 cbar y cortar el riego cuando la lectura del sensor sea de 10 cbar (Figura 2).

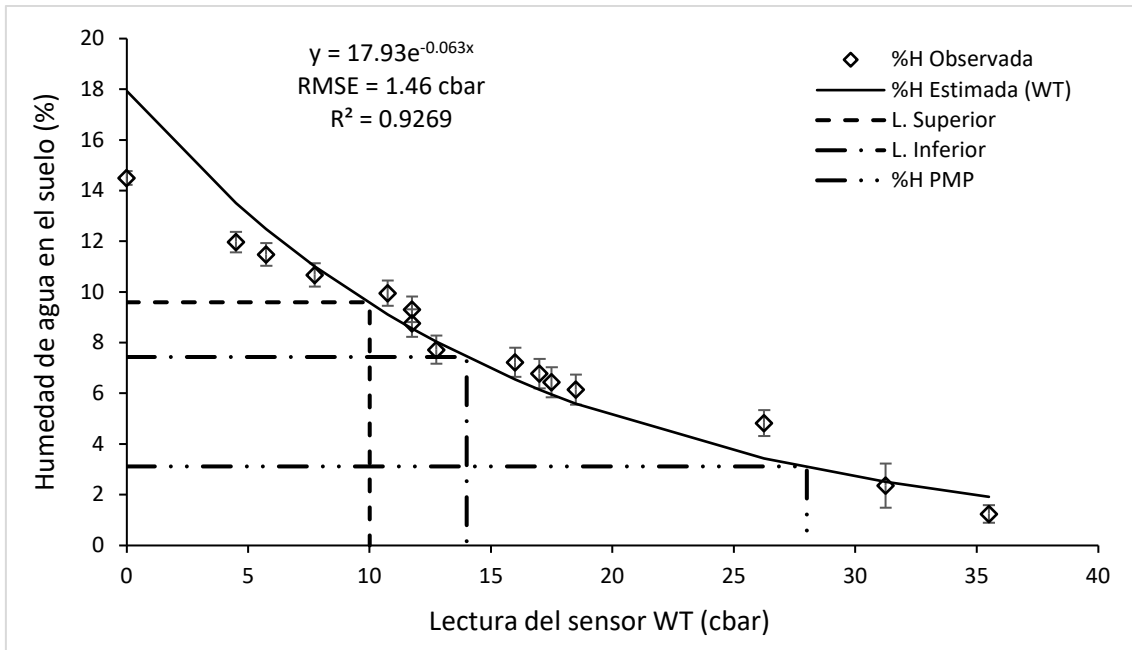


Figura 2. Curva de calibración del sensor de humedad Watermark 200ss®
Calibración del Tensiómetro

Con el modelo se obtuvo una lectura del sensor de 9.23 y 11.94 cbar para L. Superior y L. Inferior respectivamente (Figura 3). Sin embargo, el sensor watermark y el tensiómetro son de matriz granular y capsula porosa respectivamente, su lectura es basada en el punto de equilibrio entre la humedad del suelo y la humedad del sensor, por esta razón, se debe considerar el tiempo de retardo para alcanzar este equilibrio. Es recomendable obtener la lámina de riego requerida para subir de 7.44% a 9.6% de humedad y únicamente utilizar el sensor para identificar el tiempo oportuno del riego.

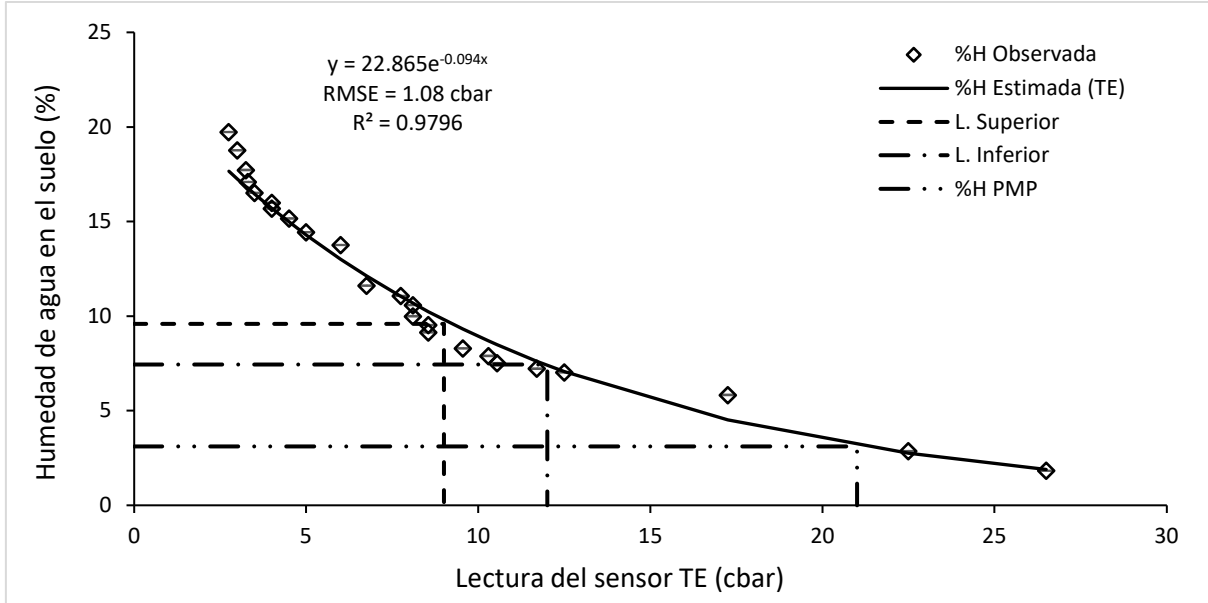


Figura 3. Curva de calibración del sensor de humedad tensiómetro agrícola Irrometer® modelo SR de punta azul

Conclusiones

La caracterización de las propiedades hídricas de este suelo franco arenoso mediante el modelo de van Genuchten proporciona una base sólida para identificar los límites superiores e inferiores de humedad a la que se debe mantener el cultivo de manera óptima. Por otro lado, los modelos exponenciales que relacione la lectura de los sensores con respecto a la humedad del agua en suelo mostraron un ajuste adecuado, sin embargo, además de la calibración exhaustiva de los sensores en la selección se deben considerar factores como el costo del sensor, precisión requerida, rango de humedad a medir y muy importante (no consideradas en este trabajo) ver la respuesta del sensor a condiciones operativas considerando un cultivo y la interacción con el suelo donde se desarrolla.

Referencias bibliográficas

- Adla, H. (2019). Protocolo para calibración de sensores de humedad en medios porosos. Múnich, Alemania: Universidad Técnica de Múnich.
- Chaubey, I., & Mani, I. (2019). Global water security conference for agriculture and natural resources: An ASABE Global Initiative conference. Resource Magazine, 26(3), 12-14.
- CONADI. (2017). Programación de riego en suelos áridos. México: Comisión Nacional de Desarrollo Agrario.

- CONAGUA (2024). Informe sobre el manejo de recursos hídricos en Zacatecas. Comisión Nacional del Agua.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Parts I–III. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Parts I–III. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.
- Dhyani, R., Manne, N., Garg, J., Motwani, D., Shrivastava, A. K., & Sharma, M. (2024). A Smart Irrigation System Powered by IoT and Machine Learning for Optimal Water Management. In 2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE) (pp. 1801-1805). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617429>
- Heng, L. K., Keller, G., Scotter, D. R., & Oweis, T. (2009). Using root mean square error (RMSE) to measure model performance. *Journal of Hydrology*, 9(3), 51-61.
- IMTA. (1995). Estrategias para el uso eficiente del agua en la agricultura en zonas áridas y semiáridas. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INIFAP. (2012). Estudio sobre las necesidades hídricas de cultivos en Zacatecas. Zacatecas, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- INIFAP. (2021). Investigación en condiciones controladas: Campo experimental INIFAP Calera, Zacatecas, México. Zacatecas, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Kumar, K. P., & Manjula, S. (2024). Unlocking Water Conservation: Synergizing IoT and Machine Learning for Agricultural Irrigation Efficiency. In 2024 International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKECS) (pp. 1-7). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICKECS61492.2024.10617221>
- Núñez-Ramírez, J. (2021). Manejo eficiente del agua de riego en cultivos de zonas áridas. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 5(2), 55-64.
- Pandya, A. B. (2023). Towards sustainable agricultural water management. *Irrigation and Drainage*, 72(4), 1188-1191. <https://doi.org/10.1002/ird.2893>
- Paul A, Sarma HH, Kakoti M, Talukdar N, Dutta SK, Hazarika P, Goswami A. (2023). Irrigating with Intelligence: Sensor-Based Strategies for Efficient Agriculture—A review. *Ecology, Environment & Conservation*. 30(Suppl.), 338-343. <http://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i03s.058>
- Richards, L. A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soils. *Soil Science*, 66(2), 105-110.
- Servín Palestina, M. (2024). Modelación dinámica del crecimiento de frijol con diferentes niveles de agua en el suelo. Campo Experimental Zacatecas, INIFAP.
- Starr, J. L., & Paltineanu, I. C. (2002). Accuracy of soil water sensors in calibrated and uncalibrated conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 30-41.
- Troy, T. J., Bowling, L. C., Jame, S. A., Lee, C. I., Liu, J., Perry, C., & Richter, B. (2023). Envisioning a sustainable agricultural water future across spatial scales. *Environmental Research Letters*, 18(8), 085003. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/ace206>
- USDA. (1993). Soil Survey Manual (Handbook No. 18). Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (NRCS).
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2018). Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment. Academic Press.
- Wu, B., Tian, F., Zhang, M., Piao, S., Zeng, H., Zhu, W., ... & Lu, Y. (2022). Quantifying global agricultural water appropriation with data derived from earth observations. *Journal of Cleaner Production*, 358, 131891. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131891>

Zhiyong, Z., Baomin, F., Chao, S., Xiaoxian, Z., Qingwen, Z., & Bing, Y. (2022). Advances in root system architecture: functionality, plasticity, and research methods. *Journal of Resources and Ecology*, 14(1), 15-24. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2023.01.002>