



## Evaluación y estimación de curvas de calibración de dispositivos para medir humedad de suelo\*

### Evaluation and estimation of calibration curves of devices to measure soil moisture

*Aquileo Daniel González de León<sup>1</sup>, Luis Alberto Sandoval Mejía<sup>2</sup>, Gloria Elizabeth Arévalo-Valderrama<sup>2</sup>, Oriana Michelle Gómez<sup>3</sup>, Brian Stiven Caro<sup>3</sup>*

\* Recepción: 16 de junio, 2023. Aceptación: 4 de septiembre, 2023. El trabajo formó parte de una tesis de maestría del primer autor que corresponde al proyecto digitalización de la agricultura a pequeña escala financiado por el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO).

<sup>1</sup> Centro Internacional de Agricultura Tropical, Palmira, Valle del Cauca, Colombia. [aquileo.gonzalezdeleon19@gmail.com](mailto:aquileo.gonzalezdeleon19@gmail.com) (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-3674-6125>).

<sup>2</sup> Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, Tegucigalpa, Honduras. [lsandoval@zamorano.edu](mailto:lsandoval@zamorano.edu) (<https://orcid.org/0000-0002-2621-933X>); [ggauggelarevalo@hotmail.com](mailto:ggauggelarevalo@hotmail.com) (<https://orcid.org/0000-0001-7323-1238>).

<sup>3</sup> Visualiti SAS, Palmira, Valle del Cauca, Colombia. [anairo11@gmail.com](mailto:anairo11@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-1810-8576>); [bs.carro@gmail.com](mailto:bs.carro@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0001-7711-424X>).

## Resumen

**Introducción.** Las medidas de adaptación al cambio climático requieren de la toma de decisiones informadas. Sin embargo, la agricultura de pequeña escala muestra bajas tasas de adopción de tecnologías por su costo y falta de conectividad. **Objetivo.** Evaluar tres prototipos de dispositivos para agricultura de pequeña escala y de bajo costo para medir humedad de suelo en diferentes texturas, así como determinar las respectivas ecuaciones de calibración y los efectos de conductividad eléctrica y temperatura en la medida de humedad. **Materiales y métodos.** Se evaluaron tres prototipos de dispositivos de medición y registro de humedad de suelo, en suelos con diferencial en contenido de arcilla/arena y conductividad eléctrica en parcelas productivas de la Universidad Zamorano, en Honduras; y Finca demostrativa en Popayán, Colombia, durante el primer trimestre del 2022. Se tomaron como referencia sensores comerciales para la comparación del desempeño de los prototipos, mediante análisis de regresión de las lecturas por hora de los sensores durante 90 días. Se recolectaron las variables de conductividad eléctrica (dS/m) y temperatura para determinar la influencia en la precisión de la lectura de humedad. **Resultados.** Los dispositivos de medición y registro de humedad presentaron un mejor desempeño en suelos con menor contenido de arena. La medición de los dispositivos sobrestimó entre 0,19 y 0,52 puntos porcentuales la lectura de humedad por cada grado adicional de temperatura del suelo, y que por cada dS/m adicional de conductividad eléctrica la lectura se debe ajustar entre 8 y 55 puntos porcentuales. **Conclusiones.** El prototipo A fue el dispositivo más exacto, mientras que el prototipo B fue el más preciso, con respecto a los sensores comerciales. Los dispositivos de humedad presentaron un mejor desempeño en suelos con menor contenido de arena. Los tres modelos evaluados obtuvieron el mejor desempeño en suelo franco con contenido medio de arcilla.

**Palabras claves:** ecuaciones de calibración, contenido volumétrico, conductividad, diferencial textural.



## Abstract

**Introduction.** Climate change adaptation measures require informed decision-making. However, small-scale agriculture shows low rates of technology adoption due to cost and lack of connectivity. **Objective.** To evaluate three low-cost prototypes of small-scale agriculture devices for soil moisture measurement in different soil textures, as well as to determine the respective calibration equations, and the effects of electrical conductivity and temperature on moisture measurement. **Materials and methods.** Three measurement and recording prototypes for soil moisture were evaluated in soils with variations in clay/sand content and electrical conductivity in productive plots at Zamorano University in Honduras and a demonstration farm in Popayán, Colombia during the first quarter of 2022. Commercial sensors were used as a reference to compare the performance of the prototypes through regression analysis of hourly sensor readings over 90 days. Electrical conductivity (dS/m) and temperature variables were collected to determine their influence on moisture reading accuracy. **Results.** The soil moisture measurement devices showed better performance in soils with lower sand content. The measurement from the devices overestimated moisture readings by 0.19 to 0.52 percentage points for each additional degree of soil temperature. Additionally, for each additional dS/m of electrical conductivity, the reading needed adjustment by 8 to 55 percentage points. **Conclusions.** Prototype A was the most accurate device, while prototype B was the most precise compared to commercial sensors. Soil moisture devices performed best in soils with lower sand content. The three models evaluated performed best in loam soil with a medium clay content.

**Keywords:** calibration equations, volumetric content, conductivity, textural differential.

## Introducción

Uno de los principales efectos del cambio climático en América Latina y El Caribe es la alteración en la distribución de las precipitaciones anuales, que puede expresarse mediante temporadas de lluvias irregulares. Proyecciones realizadas sugieren que los impactos del cambio climático afectarán la disponibilidad de agua, lo que compromete la producción de alimentos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015). Los sistemas de pequeña escala son los más vulnerables, ya que son sistemas productivos que se caracterizan por depender de las precipitaciones y de la capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo (Lemi & Hailu, 2019). Para mitigar los posibles efectos adversos del cambio climático, es necesario facilitar la adopción de alternativas de adaptación y mitigación al cambio climático, para así garantizar la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios.

En los últimos años, se han desarrollado múltiples técnicas y equipos para la estimación del contenido de humedad en el suelo, donde los más relevantes han sido los sensores de humedad de suelo (Lekshmi et al., 2014; Usuga & Pauwels, 2008). Independiente de su importancia en el manejo de los cultivos, el acceso a tecnologías de agricultura de precisión como sensores de humedad de suelo es un desafío para pequeños y medianos productores. Un costo elevado, complejidad de uso y la dependencia de conectividad a internet son algunas de las razones que limitan la adopción de nuevas tecnologías en agricultura (Escobar, 2016).

El proceso de adopción de innovaciones agrícolas es liderado por los grandes productores, quienes, son líderes en sus respectivos rubros, adoptan las tecnologías más temprano y por lo tanto, se benefician primero de estas (Avendaño-Ruiz et al., 2017). La razón principal por la que existe esta brecha de adopción entre pequeños y grandes productores es por falta de acceso a recursos financieros que permitan invertir en nuevas tecnologías. Por lo tanto, los pequeños productores se vuelven adoptantes tardíos, con mucha dependencia de programas gubernamentales, de extensión y organismos internacionales. El desarrollo de tecnologías adaptadas a las necesidades de sistemas productivos de pequeña escala, como los sensores de humedad de suelo, pueden reducir la brecha de adopción existente entre pequeños y grandes productores (Avendaño-Ruiz et al., 2017).

Con el propósito de reducir la brecha de adopción de tecnologías de agricultura de precisión y digital, el proyecto de Digitalización de la Agricultura de Pequeña Escala, ejecutado por la Universidad Zamorano, la Alianza Bioersity-Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y la empresa Visualiti, trabajó en el diseño de una solución tecnológica que contribuya a la democratización de la era digital en la agricultura, con un dispositivo que permita medir y registrar humedad de suelo, robusto, de bajo costo y alta usabilidad (medida en la cual un producto puede ser usado por usuarios específicos para conseguir objetivos específicos con efectividad, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso especificado), orientado a productores de pequeña y mediana escala.

En la actualidad, los productores de pequeña y mediana escala, que realizan agricultura familiar o de subsistencia y productores con menos de 10 ha, son los menos beneficiados de la revolución digital en la agricultura (Trendov et al., 2019). Con una solución tecnológica que les permita a los productores medir la humedad de suelo, estos pueden tomar decisiones informadas sobre el cultivo, adaptarse a diversas condiciones ambientales y utilizar recursos naturales, como el agua, de manera eficiente. El proyecto ha logrado evidenciar la necesidad y demanda de la tecnología mediante los reconocimientos que ha recibido el mismo, al ser un producto inclusivo en comparación a los dispositivos disponibles en el mercado.

La precisión de medición de humedad del suelo de los sensores está condicionada por el principio de la tecnología que utiliza el sensor y de las características del suelo, como textura, temperatura, densidad aparente y salinidad (Mittelbach et al., 2012). Múltiples autores han realizado validaciones de sensores de humedad de suelo, donde evalúan su funcionamiento del mismo en diferentes condiciones de tipo de suelo, salinidad, temperatura, contenido de materia orgánica, y densidad aparente, entre otros (Adeyemi et al., 2016; Datta et al., 2018; Gonzalez Ortiz, 2020). Luego, la precisión de las mediciones puede ser optimizada con la utilización de curvas de calibración específicas a los tipos de suelo (Usuga & Pauwels, 2008).

La evaluación del funcionamiento de los dispositivos y sensores puede realizarse en condiciones controladas de laboratorio o en condiciones de campo, mientras que las calibraciones de fábrica de los sensores de humedad de suelo se realizan en condiciones de laboratorio, que suelen ser limitadas y no reflejar las condiciones de campo (Feng & Sui, 2020). Es necesario calibrar los sensores de humedad en campo, en las condiciones en que se utilizarán, y con métodos de referencia confiables (Robinson, 2009). Algunos fabricantes afirman que los sensores no necesitan de calibración, pero esto sería cierto si los sensores son utilizados en condiciones ideales (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2008).

Este estudio contribuye a la literatura mediante la evaluación de tres prototipos para medir y registrar humedad de suelo diseñados para agricultores de pequeña escala, en agricultura familiar y de subsistencia. A diferencia de la literatura existente, los dispositivos evaluados son productos mínimos viables con una estructura básica para medición de la humedad del suelo, con el objetivo de reducir su costo y aumentar así su probabilidad de adopción. El objetivo del estudio fue evaluar tres prototipos de dispositivos para agricultura de pequeña escala de bajo costo para medir humedad de suelo en diferentes texturas de suelo, así como determinar las respectivas ecuaciones de calibración y los efectos de conductividad eléctrica y temperatura en la medida de humedad.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

Los prototipos se sometieron a pruebas de campo en parcelas seleccionadas por conveniencia que cumplieran con los criterios de: (1) fácil acceso, (2) diversidad de texturas de suelo, y (3) diversidad de cultivos, estableciéndose una parcela en Colombia y cuatro en Honduras.

La parcela de prueba en Colombia se localizó en un cultivo de café (*Coffea arabica*), ubicada en Cerrillos Popayán, Valle del Cauca, Colombia. En Honduras, tres parcelas estaban localizadas en el lote La Vega, y una parcela en un lote de una finca agroecológica. Ambos lotes son parte del campus de la Universidad Zamorano, en el Valle del Yegüare, departamento de Francisco Morazán, Honduras. Las parcelas correspondientes a La Vega se establecieron en un cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) y el lote de la finca agroecológica en un cultivo de maíz (*Zea mays*). Las características de suelo de cada parcela se pueden observar en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Características fisicoquímicas de los suelos de las parcelas de prueba, a 30 cm de profundidad, Laboratorio de Suelos Zamorano, Honduras, enero de 2022.

**Table 1.** Physicochemical characteristics of the soils of the test plots, at a depth at 30 cm, Zamorano Soil Laboratory, Honduras, January 2022.

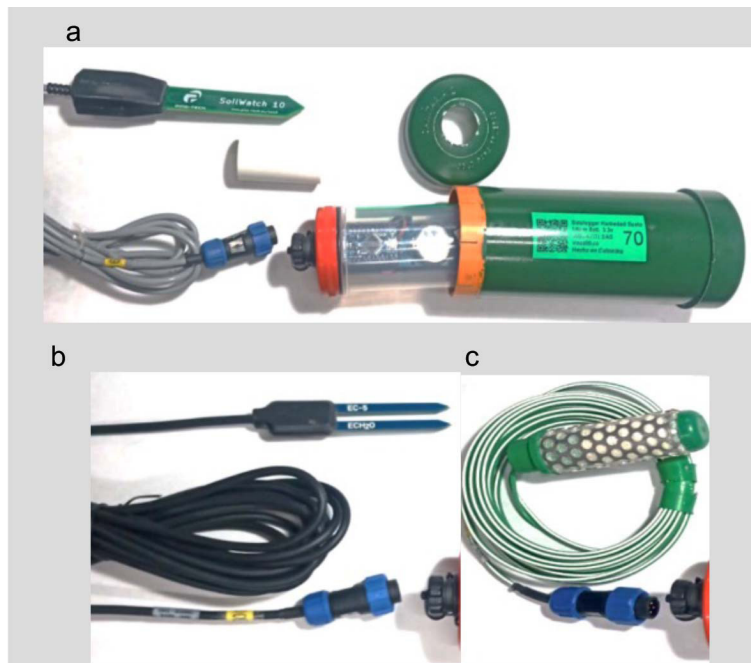
Parcela de prueba	Textura	g/100g de suelo			pH	M.O.
		Arena	Limo	Arcilla		
Finca agroecológica*	Franco arenoso	64	20	16	5,83	2,65
La Vega*	Franco	32	46	22	5,81	2,47
La Vega*	Franco	40	40	20	5,69	2,05
La Vega*	Franco	26	50	24	5,83	2,57
Cerrillos Popayán**	Franco arcilloso	36	33	31	5,22	3,10

M.O.: materia orgánica. \* Honduras. \*\* Colombia. / M.O.: organic matter. \* Honduras. \*\* Colombia.

## Descripción de los dispositivos

Se evaluaron tres prototipos de sensores de medición y registro de humedad de suelo, denominados prototipo A (SW 10), B (EC5) y C (SS200). Los prototipos fueron diseñados para cumplir con las características de bajo costo, de alta usabilidad y robustez, estos son muy similares en el diseño del registrador de datos y con tres sondas comerciales diferentes. Al momento de las pruebas, los dispositivos contaban con una autonomía teórica de seis meses de operación continua sin necesidad de recarga o cambio de batería. Uno de los prototipos desarrollados en el proyecto se puede observar en la Figura 1. El desarrollo de los prototipos se dio entre los meses de agosto y septiembre de 2021.

Los dispositivos contaban con tres componentes principales: 1) la sonda de medición, 2) contenedor interior, con la batería y dispositivo registrador, y 3) la carcasa externa de protección. La carcasa de protección externa, fabricada a partir de tubo cloruro de polivinilo (PVC), les brinda robustez a los dispositivos, al protegerlos contra factores ambientales como humedad, temperatura, radiación ultravioleta, y daño mecánico. Una de las tapas era removible, para facilitar la instalación y desinstalación del contenedor interno y el sensor. El contenedor interior encapsulaba una tarjeta electrónica de procesamiento, una memoria microSD para el registro de datos y una batería de alimentación de cara para el dispositivo. La tarjeta central de procesamiento y registro de datos fue desarrollada por la empresa Visualiti SAS de Colombia, y se diferenciaban en el sensor o sonda de medición. Las sondas comerciales utilizadas fueron Soil Watch 10 (SW 10) de Pinotech, ECH2O EC-5 de Meter Group, y Watermark 200SS de Irrrometer, en los prototipos A, B y C, respectivamente. Las primeras dos sondas son de principio de medición de reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR, siglas en inglés) y la última de matriz granular. Las especificaciones técnicas de los dispositivos son de acceso abierto y están disponibles en la página del proyecto (<https://www.fontagro.org/new/proyectos/digitalization-small-scale/es>). Las características de medición y electrónicas de los prototipos evaluados se muestran en el Cuadro 2.



**Figura 1.** Imágenes de los sensores de medición desarrollados y registro de humedad de suelo, se observan el sistema de almacenamiento y batería (capsula verde) y las tres diferentes sondas. a) Sonda del modelo A. b) Sonda del modelo B. c) Sonda del modelo C. Imagen de empresa desarrolladora de tecnológica agrícola Visualiti S.A, Palmira, Colombia, septiembre de 2021.

**Figure 1.** Images of the measurement sensors developed and soil moisture record, the storage and battery system (green capsule) and the three different probes are observed. a) Model A probe. b) Model B probe. c) Model C probe. Image of a company that develops agricultural technology Visualiti S.A, Palmira, Colombia, September 2021.

**Cuadro 2.** Características de especificaciones de medición de los sensores y registro de humedad de suelo brindadas por fabricante comercial de la sonda, y especificaciones electrónicas de los modelos desarrollados por el fabricante Visualiti proveedor del proyecto, Palmira, Colombia, septiembre de 2021.

**Table 2.** Characteristics of sensor measurement and soil moisture recording specifications provided by the commercial manufacturer of the probe, and electronic specifications of the models developed by the manufacturer Visualiti, project supplier, Palmira, Colombia, September 2021.

Características de medición	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Sonda/sensor	SoilWatch-10	ECH2O-EC5	SS 200
Fabricante comercial	Pinotech	Meter Group	Irrrometer
Principio de funcionamiento	FDR	FDR	Matriz Granular
Unidad de medida	WCV - %	WCV - $m^3/m^3$	kPa
Resolución	0,1 %	0,001 $m^3/m^3$	1 kPa
Rango de medición	0 – 100 %	0 – 1 $m^3/m^3$	0 - 200 kPa
<b>Características electrónicas</b>			
Amperaje	24 mA	20 mA	100 mA
Voltaje de trabajo	3,1 - 5 v	2,5 - 3,6 v	3-5 v
Tiempo de respuesta	200 ms	100 ms	60 ms
Tipo de salida	Voltaje	Voltaje	Resistencia

FDR: Reflectometría de dominio de tiempo. / FDR: Frequency domain reflectometry.

## Descripción de los dispositivos control o de referencia

Los sensores Teros 12<sup>®</sup> y Teros 21<sup>®</sup> (Meter Group, Inc.) fueron identificados como los sensores de referencia contra los cuales se compararon los prototipos desarrollados. Estos sensores son de alta confiabilidad, aprobados por instituciones de prestigio, desarrolladores de equipos tecnológicos, universidades y empresas agrícolas (Meter Group, n.d.a, Meter Group, n.d.b). Ambos sensores fueron acoplados a un dispositivo de carga, almacenamiento y administración de energía diseñado por Visualiti y utilizado a escala comercial.

El sensor FDR Teros 12<sup>®</sup> brinda estimaciones de contenido volumétrico del agua ( $m^3/m^3$ ), conductividad eléctrica (dS/m) y temperatura en el suelo ( $^{\circ}C$ ). El sensor Teros 21<sup>®</sup> mide el potencial hídrico del suelo, compuesto por un sensor de humedad y cerámica porosa. El dispositivo mide el contenido de humedad en la cerámica y lo convierte a potencial hídrico. Este brinda estimaciones del potencial matricial en kpa y la temperatura en el suelo ( $^{\circ}C$ ). Los datos obtenidos de los sensores de referencia fueron utilizados para la precisión y exactitud de los prototipos y como valores de referencia para la estimación de las ecuaciones de calibración. Para los prototipos A y B el control utilizado fue el sensor Teros 12<sup>®</sup>, mientras que para el modelo C se utilizó el sensor Teros 21<sup>®</sup>.

## Establecimiento del ensayo e instalación de los sensores

La instalación de los dispositivos en la parcela experimental de Colombia inició en el mes de diciembre del año 2021 y finalizó en febrero del año 2022. En Honduras, los dispositivos fueron instalados entre enero y febrero del año 2022 para las parcelas de frijol y abril en las parcelas de maíz. Cada una de las parcelas de prueba consistió en cinco dispositivos, que correspondían a los tres prototipos y sus respectivos controles. La profundidad de instalación de los sensores fue a la profundidad promedio esperada de las raíces del cultivo. En el caso del cultivo de frijol se instaló a una profundidad de 15 cm, para cultivo de maíz 30 cm en café a 25 cm.

La instalación de los dispositivos se realizó con un barreno manual donde se preparó un orificio de instalación de 10 cm de diámetro. Se procuró evitar la perturbación del suelo en el punto de instalación del sensor, se realizó un orificio pequeño que permite volver a empaquetar (regreso del suelo según los horizontes) de manera correcta. Se realizó una verificación de la correcta instalación y registro de humedad a las 24 h posterior a la instalación.

## Recolección de datos

Se recolectaron datos se realizó durante 60 días en el cultivo de frijol, 90 días en maíz y 90 días en café. A través de los dispositivos de control, se recolectó los datos de conductividad eléctrica (CE) y temperatura del suelo. La frecuencia de registro de todas las variables fue cada 60 min.

## Análisis de datos

El análisis de datos constó de tres etapas: 1) estadística descriptiva, 2) evaluación de la exactitud y precisión de las mediciones, y 3) análisis de regresión para la estimación de las curvas de calibración.

Para evaluar la exactitud de las mediciones, se realizaron pruebas t-estudiante emparejadas, de las medidas de los prototipos y su respectivo control a las mismas horas. La precisión fue evaluada mediante un modelo de regresión lineal simple con la medida de humedad del prototipo como variable independiente y la medición del control como variable dependiente, donde el coeficiente de determinación del modelo es la medida de precisión. La estimación de las curvas de calibración se realizó mediante un modelo de regresión lineal múltiple, según se muestra en la ecuación 1.

$$\%VWC \text{ control} = \beta_0 + \beta_1 \%VWC \text{ Prototipo} + \beta_2 \text{CE suelo} + \beta_3 \text{Temperatura suelo} \quad (1)$$

Donde,  $\beta_0$  es el intercepto,  $\beta_1$  es el coeficiente de ajuste a la medida del prototipo,  $\beta_2$  es el coeficiente de ajuste para la conductividad eléctrica,  $\beta_3$  es el coeficiente de ajuste para la temperatura, %VWC es el contenido volumétrico de agua (%), CE conductividad eléctrica del suelo. La inclusión de las variables de CE y T° se realizó para los datos recolectados en la parcela La Vega, para los modelos A y B, correspondientes a los sensores FDR.

Es importante destacar que se tuvieron todas las consideraciones posibles para igualar la condición en la que se instalaron los sensores, sin embargo, por la variabilidad en los suelos era natural esperar diferencias en las medidas, ya sea por leves diferencias en las condiciones de suelo o por el alto número de observaciones, que tienden a reducir el error estándar y aumentar la probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas, pero no prácticas. En todos los modelos se contó con más de 800 observaciones, a excepción del prototipo B en La Vega 40 % arena.

### Ranking y selección de la mejor alternativa

Para evaluar de forma integral los dispositivos y definir la mejor alternativa para el proyecto, se hizo un ranking de los prototipos según su exactitud, precisión y costo, se calculó un puntaje para cada prototipo donde se sumó sus posiciones en los rankings. La mejor alternativa se identificó por tener el puntaje más bajo.

## Resultados

Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las mediciones de humedad de los prototipos y sus controles (Cuadro 3), se rechazó la hipótesis nula de una diferencia media igual a cero. Las medidas del sensor C (SS200) se presentan separadas por tener diferente unidad de medición (Cuadro 4).

**Cuadro 3.** Estadística descriptiva de la diferencia de la medición de humedad de suelo expresado en volumen de agua por volumen de suelo (%) de los prototipos A y B (sensores de medición y registro de humedad de suelo). Parcelas La Vega, Honduras y Cerrillos, Popayán, Colombia, entre los meses de noviembre 2021 y febrero 2022.

**Table 3.** Descriptive statistics of the difference in soil moisture measurement expressed in volume of water per volume of soil (%) of prototypes A and B (soil moisture measurement and recording sensors). Plots La Vega, Honduras and Cerrillos, Popayán, Colombia, between the months of November 2021 and February 2022.

Parcela	Prototipo	N	Diferencia media*	DE $\sigma$	Valor p	Frecuencia porcentual
Cerrillos Popayan	A (SW 10)	1342	-6,18	1,41	<0,0001	100
	B (EC5)	1342	11,14	1,42	<0,0001	100
La Vega	A (SW 10)	810	-1,24	1,80	<0,0001	100
Arena 40%	B (EC5)	621	1,84	1,09	<0,0001	77
La Vega	A (SW 10)	775	-1,39	0,89	<0,0001	100
Arena 32%	B (EC5)	775	6,90	1,40	<0,0001	100
La Vega	A (SW 10)	810	-4,22	1,10	<0,0001	100
Arena 26%	B (EC5)	810	9,08	0,72	<0,0001	100
Finca agroecológica	A (SW 10)	1153	-13,71	0,94	<0,0001	100
	B (EC5)	1153	5,47	0,54	<0,0001	100

\*Diferencia media y desviación estándar expresados en puntos porcentuales donde se utilizó el valor de prototipo menos valor de referencia. N: número de observaciones; DE: desviación estándar. / \*Mean difference and standard deviation expressed in percentage points using prototype value minus reference value. N: number of observations; SD: standard deviation.

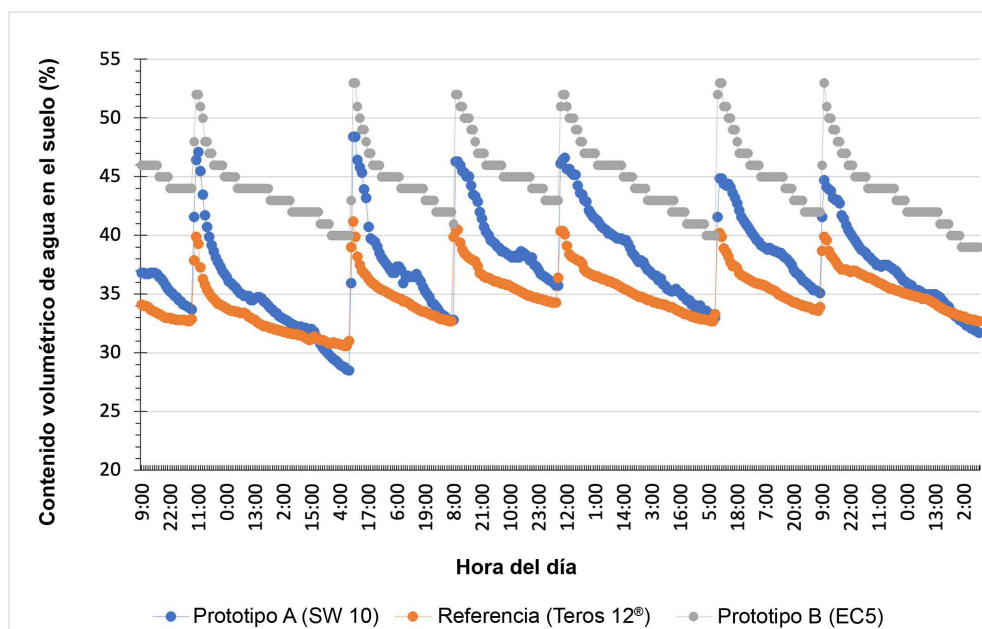
**Cuadro 4.** Estadística descriptiva de la diferencia de la medición de humedad de suelo expresado en volumen de agua por volumen de suelo (%) del prototipo C (sensor de medición y registro de humedad de suelo). Parcelas La Vega, Honduras y Cerrillos, Popayán, Colombia, entre los meses de noviembre 2021 y febrero 2022.

**Table 4.** Descriptive statistics of the difference in soil moisture measurement expressed in volume of water per volume of soil (%) of prototype C (soil moisture measurement and recording sensor), La Vega, Honduras and Cerrillos plots, Popayán, Colombia, between the months of November 2021 and February 2022.

Parcela	Prototipo	N	Diferencia media	DE $\sigma$	Valor p	Frecuencia porcentual
La Vega: arena 32%	C (SS200)	775	-59,47	6,17	<0,0001	100
La Vega: arena 40%	C (SS200)	810	-174,30	10,32	<0,0001	100
La Vega: arena 26%	C (SS200)	810	-20,73	17,13	<0,0001	100
Finca agroecológica	C (SS200)	1003	-1,94	14,18	<0,0001	87

\*Diferencia media y desviación estándar expresados en puntos porcentuales donde se utilizó el valor de prototipo menos valor de referencia. N: número de observaciones; DE: desviación estándar. / \*Mean difference and standard deviation expressed in percentage points using prototype value minus reference value. N: number of observations; SD: standard deviation.

En la diferencia de las medias se puede observar que el prototipo A (SW 10), para todas las parcelas evaluadas, subestimó el contenido de humedad de suelo real del suelo (diferencia media negativa). Mientras que el prototipo EC5 sobrestimó el contenido de humedad del suelo con respecto al sensor de referencia (diferencia media positiva). La Figura 2 muestra un ejemplo de las mediciones de los prototipos A (línea azul) y B (línea gris) con respecto al control (línea naranja), en un suelo franco en Honduras.



Para el prototipo C se observó el mismo comportamiento, donde se observó la diferencia de las medias estadísticas diferente de cero. En cuanto a las mediciones del prototipo C se observó valores negativos en el valor de la diferencia media, por lo que el prototipo subestimó las mediciones de humedad con respecto al sensor de referencia (Cuadro 4).

### Comportamiento según tipo de suelo

En los suelos con mayor contenido de arena, correspondientes a la parcela de la finca agroecológica y Cerrillos Popayán, fue donde los dispositivos mostraron menor precisión para los tres prototipos evaluados. En los suelos arenosos, los coeficientes de determinación de los modelos fueron menores a 0,70. En contraste, en los suelos con menor contenido de arena y mayor arcilla, tuvieron mejor ajuste de los modelos. Se observó que los tres prototipos evaluados presentaron una mejor precisión o ajuste a la regresión lineal en el suelo con 32 % de arena, donde todos obtuvieron un ajuste superior a 0,95 ( $R^2=0,95$ ). El segundo mejor ajuste de los modelos se observó en el suelo con 26 % de arena, con valores de los coeficientes superiores a 0,92 ( $R^2=0,92$ ) (Cuadro 5).

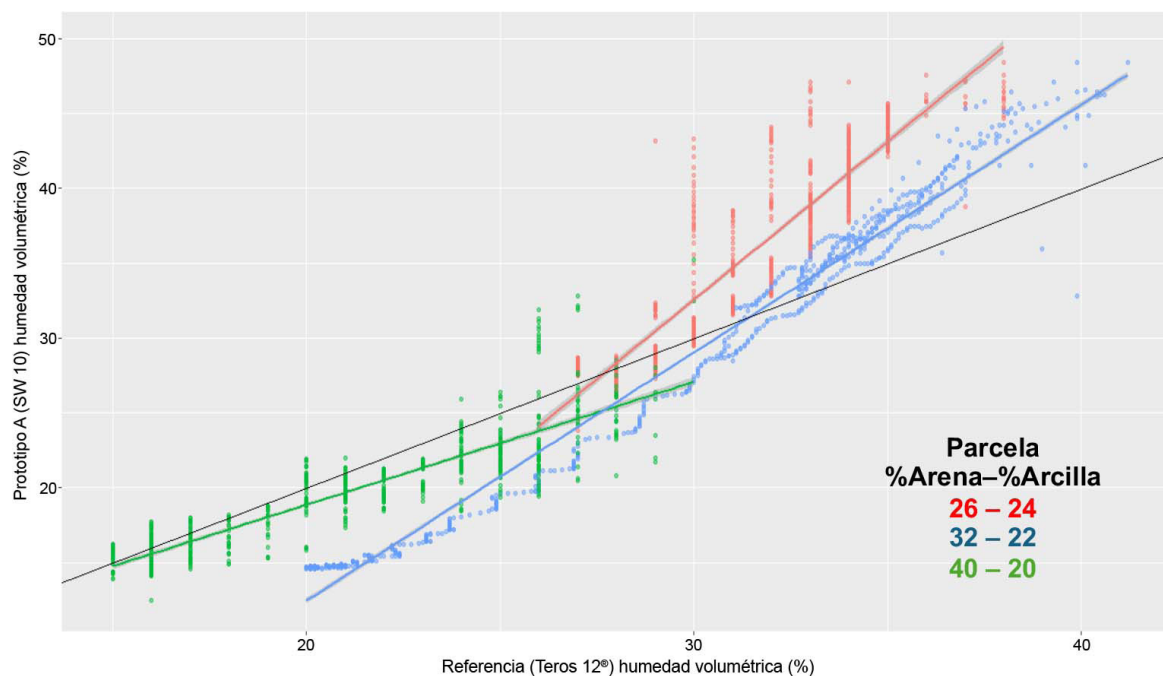
**Cuadro 5.** Resultados de los análisis de regresión simple entre prototipo y sensor de medición y registro de humedad de suelo, de referencia para cada parcela de prueba, Parcelas La Vega, Honduras y Cerrillos, Popayán, Colombia, entre los meses de noviembre 2021 y febrero 2022.

**Table 5.** Results of the simple regression analysis between the prototype and the measurement sensor and soil moisture record, reference for each test plot, Parcelas La Vega, Honduras and Cerrillos, Popayán, Colombia, between the months of November 2021 and February 2022.

Parcela %A-%Ar	Prototipo	R	R <sup>2</sup>	RMSE	Modelo de regresión $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \epsilon$
Cerrillos Popayán 36 – 31	A- SW 10	0,78	0,60	0,53	%VWC = 14,36 + 0,81 (% VWC SW10)
	B- EC5	0,78	0,62	0,53	%VWC = -1,43 + 0,84 (% VWC EC5)
La Vega: 40 – 20	A- SW 10	0,90	0,80	1,80	% VWC = 1,68 + 0,98 (% VWC SW10)
	B- EC5	0,95	0,90	1,08	%VWC = 3,35 + 0,64 (% VWC EC5)
	C – SS200	0,95	0,90	84,68	Kpa = 95,25 + 7,78 (kpa SS200)
La Vega: 32 – 22	A- SW 10	0,99	0,98	0,90	%VWC = 12,84 + 0,59 (% VWC SW10)
	B- EC5	0,97	0,95	1,40	%VWC = 4,54 + 0,68 (% VWC EC5)
	C – SS200	0,95	0,90	28,08	Kpa = 78 + 5,19 (kpa SS200)
La Vega: 26 – 24	A- SW 10	0,93	0,86	1,10	%VWC = 17,03 + 0,40 (% VWC SW10)
	B- EC5	0,97	0,94	0,72	%VWC = 15,91 + 0,38 (% VWC EC5)
	C – SS200	0,94	0,89	17,07	Kpa = 27,54 + 3,23 (kpa SS200)
Finca Agroecológica 64 – 16	A- SW 10	0,84	0,70	0,94	%VWC = 17,74 + 0,76 (% VWC SW10)
	B- EC5	0,95	0,90	0,54	%VWC = 14,77 + 0,44 (% VWC EC5)
	C – SS200	0,80	0,65	14,18	Kpa = 11,34 + 2,07 (% kpa SS200)

%A: porcentaje de arena; %Ar: porcentaje de arcilla; R: coeficiente de Pearson; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; %VWC: % contenido volumétrico de agua. / %A: percentage of sand; %Ar: percentage of clay; R: Pearson coefficient; R<sup>2</sup>: coefficient of determination; %VWC: % volumetric water content.

El tipo de suelo afectó la medición del prototipo con la sonda SW10 (Figura 3). La sonda SW10 subestimó el contenido de humedad en suelos con mayor contenido de arena, en los suelos con menos arena y más arcilla, con respecto a la sonda de referencia (Figura 3).



**Figura 3.** Regresiones por tipo de suelo de sensores de medición y registro de humedad de suelo, en parcelas La Vega, Zamorano, Honduras, enero de 2022.

El eje horizontal de la figura corresponde a la medida de humedad del sensor de referencia y el eje vertical a la medida de humedad de la sonda SW 10. La línea negra marca el punto donde la medición hubiera sido la misma con ambos sensores.

**Figure 3.** Regressions by soil type of soil moisture measurement and recording sensors, in La Vega plots, Zamorano, Honduras, January 2022.

The horizontal axis of the figure corresponds to the humidity measurement of the reference sensor and the vertical axis to the humidity measurement of the SW 10 probe. The black line marks the point where the measurement would have been the same with both sensors.

### Comparación entre prototipos

Al comparar los tres prototipos se determinó que en cuatro de los cinco sitios evaluados, el prototipo B presentó un mejor ajuste al modelo de regresión, con valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0,9, a excepción de la parcela Cerrillos Popayán donde se obtuvo un valor de 0,62. En la parcela La Vega (arena 32 %), el prototipo A fue el que presentó un mejor ajuste al modelo de regresión, con un valor de  $R^2$  de 0,98. Por lo tanto, según el criterio de precisión, el mejor prototipo corresponde al modelo B. Los ajustes del prototipo A fueron similares a los del prototipo C.

La inclusión de las variables independientes de conductividad eléctrica y temperatura del suelo a los modelos de regresión resultaron en diferencias estadísticas significativas con respecto a los modelos simples. En todos los casos, los modelos múltiples tuvieron mejor ajuste, es decir, un coeficiente de determinación mayor, en comparación con los modelos de regresión lineal simple (Cuadro 6). Por lo tanto, la inclusión de las variables de conductividad eléctrica y temperatura contribuyen a la estimación de mejores curvas de calibración de los dispositivos.

El mayor cambio en el coeficiente de determinación se puede observar en el prototipo A, que presentó un aumento en el coeficiente de determinación de 11 puntos porcentuales en el suelo con mayor cantidad de arena. El sensor que presentó el mejor ajuste al incluir las variables de conductividad y temperatura fue el modelo A.

**Cuadro 6.** Cambio en el ajuste del modelo de regresión con la inclusión de las variables de conductividad eléctrica y temperatura en los modelos A y B (sensores de medición y registro de humedad de suelo). Parcelas de La Vega, Zamorano, Honduras, enero de 2022.

**Table 6.** Change in the fit of the regression model with the inclusion of the electrical conductivity and temperature variables in models A and B (soil moisture measurement and recording sensors). Plots of La Vega, Zamorano, Honduras, January 2022.

Parcela	%A-%Ar	Prototipo o Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	R <sup>2</sup> ajustado inclusión CE y T	Cambio del R <sup>2</sup>	Valor p
La Vega:		A (SW 10)	0,80	0,91	0,11	< ,001
40 – 20		B (EC5)	0,90	0,93	0,03	< ,001
La Vega:		A (SW 10)	0,98	0,99	0,01	< ,001
32 – 22		B (EC5)	0,95	0,98	0,03	< ,001
La Vega:		A (SW 10)	0,86	0,93	0,07	< ,001
26 – 24		B (EC5)	0,94	0,96	0,02	< ,001

%A: porcentaje de arena; %Ar: porcentaje de arcilla; R: coeficiente de Pearson; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; %VWC: % contenido volumétrico de agua; CE: conductividad eléctrica del suelo. / %A: percentage of sand; %Ar: percentage of clay; R: Pearson coefficient; R<sup>2</sup>: coefficient of determination; %VWC: % volumetric water content; CE: electrical conductivity of the soil.

## Curvas de calibración

En cuanto a las curvas de calibración de los modelos A y B, se puede observar que, para ajustar el porcentaje de humedad del suelo al valor de referencia, esta debe reducirse entre 0,19 y 0,52 puntos porcentuales por cada grado adicional de temperatura del suelo (Cuadro 7). Se observó un comportamiento similar en el caso de la conductividad eléctrica, ya que en casi todas las ecuaciones el coeficiente de conductividad eléctrica fue negativo en la curva de calibración. Valores más altos de conductividad eléctrica resultaron en sobrestimación de la medición del contenido de humedad de suelo para ambos prototipos modelos (A y B). Los coeficientes muestran que por cada dS/m la lectura se debe ajustar entre 8 y 55 puntos porcentuales. Los valores de conductividad en los suelos evaluados se ubicaron entre 0,10 y 0,45 dS/m.

**Cuadro 7.** Curvas de calibración con la inclusión de las variables conductividad eléctrica y temperatura para los modelos A y B (sensores de medición y registro de humedad de suelo). Parcelas de La Vega, Zamorano, Honduras, enero de 2022.

**Table 7.** Calibration curves with the inclusion of the variables electrical conductivity and temperature for models A and B (soil moisture measurement and recording sensors), Parcelas de La Vega, Zamorano, Honduras, January 2022.

Parcela	Modelo	Curva de calibración
La Vega: arena 40%	A- SW 10	%VWC = 23,84 + 0,20 (% VWC SW10) + 28,78 (CE) – 0,52 (Temp. C)
	B- EC5	%VWC = 11,68 + 0,76 (% VWC EC5) – 8,66 (CE) – 0,47 (Temp. C)
La Vega: arena 32%	A- SW 10	%VWC = 21,84+ 0,58 (% VWC SW10) – 19,77 (CE) – 0,34 (Temp. C)
	B- EC5	%VWC = 15,84 + 0,73 (% VWC EC5) – 55,63 (CE) – 0,44 (Temp. C)
La Vega: arena 26%	A- SW 10	%VWC = 32,45 + 0,37 (% VWC SW10) – 32,04 (CE) – 0,47 (Temp. C)
	B- EC5	%VWC = 22,91 + 0,37 (% VWC EC5) – 18,51 (CE) – 0,19 (Temp. C)

%VWC: % contenido volumétrico de agua; CE: conductividad eléctrica del suelo. / %VWC: % volumetric water content; CE: electrical conductivity of the soil.

## Ranking y selección de la mejor alternativa

El prototipo B con la sonda EC5 fue el más preciso, mientras que el prototipo A fue más exacto y de menor costo, mientras que el prototipo C no fue el mejor en ninguno de los criterios (Cuadro 8). La mejor alternativa fue el prototipo A con la sonda SW-10.

**Cuadro 8.** Resultados de mejor desempeño de prototipos desarrollados (sensores de medición y registro de humedad de suelo) según las pruebas realizadas y selección final, análisis de Parcelas La Vega y Finca agroecológica, Honduras y Cerrillos, Popayán, Colombia, entre los meses de noviembre 2021 y febrero 2022.

**Table 8.** Results of the best performance of developed prototypes (soil moisture measurement and recording sensors) according to the tests carried out and final selection, analysis of Parcelas La Vega and Finca agroecológica, Honduras and Cerrillos, Popayán, Colombia, between the months of November 2021 and February 2022.

Descripción de selección o prueba	Modelo de dispositivo		
	A (SW-10)	B (EC5)	C (SS200)
Resultado de análisis de medida de precisión (1: mejor desempeño)	2	1	3
Resultado de análisis de medida de exactitud (1: mejor desempeño)	1	2	3
Resultado análisis económico (1: menor costo)	1	3	2
Sumatoria	4	6	8
Puntaje	1,33	2	2,67

Puntaje: valores cercanos a 1, presentan un mejor desempeño. / Score: values close to 1 present a better performance.

## Discusión

Los resultados de la sección anterior sugieren que el sensor más preciso fue el prototipo B, mientras que el más exacto fue el prototipo A. La precisión de los sensores medida a través de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) en los modelos de calibración fueron menores en los suelos con un mayor porcentaje de arena. Esto concuerda con los hallazgos de Gonzalez Ortiz (2020) donde se observó que sensores FDR de bajo costo presentaron un mayor ajuste ( $R^2$ ) en suelos Arcillosos y Francos, con respecto a los suelos de texturas gruesas (arenosos). En contraste, las mediciones realizadas por los sensores en los suelos arcillosos y francos fueron los menos exactos, al tener menor diferencias con respecto al control. Si se prefiere precisión a exactitud la mejor alternativa sería el prototipo B.

Los modelos con los mejores coeficientes de determinación se encontraron en los suelos francos-arcillosos, con valores entre 0,86 y 0,98, mientras que en los suelos con mayor contenido de arena tuvieron un valor de 0,65 y 0,9. Estos resultados son consistentes con González-Teruel et al. (2019), quienes en una evaluación de sensores de humedad de suelo capacitivos de bajo costo obtuvieron coeficientes de determinación de 0,8 y 0,98, para suelos arenosos y francos, respectivamente. Las ecuaciones de calibración determinadas por González-Teruel et al. (2019) fueron funciones de segundo y tercer orden, mientras que las del presente se utilizó regresión simple y múltiple (primer orden).

Los resultados encontrados sugieren que, en los suelos con mayor contenido de arcilla los sensores de capacitancia fueron más precisos, pero otros estudios afirman que la precisión disminuye a medida que incrementa el contenido de arcilla (Datta et al., 2018; Sugita et al., 2016). En suelos con altos niveles de arcillas y sales se presentó un mayor error en la predicción que en sitios de menor contenido de arcilla al evaluar cinco sensores de humedad electromagnéticos y capacitivos (Datta et al., 2018). A diferencia del presente estudio, los suelos

arcillosos del estudio de Datta et al. (2018), tenían un alto contenido de sales expresado en CE. Este contraste de resultados sugiere que la textura del suelo por sí misma, no es determinante en la precisión de los sensores, y que otros factores como la salinidad son de igual importancia.

Las curvas de calibración donde se incluyó CE como variable explicativa sobreestiman el contenido volumétrico de agua a medida que aumenta el valor de la CE. Diversos estudios han destacado el impacto que tiene la salinidad en los sensores electromagnéticos en estimar el contenido volumétrico del agua (Dalton, 1992; Wyseure et al., 2005). Por ejemplo, Dalton (1992) determinó que, en suelos salinos la constante dieléctrica estimada por los sensores TDR aumenta, y por lo tanto, sobrestima el contenido de humedad. Esto sugiere que de forma general y sin importar el tipo de sensor utilizado, en suelos más salinos las mediciones serán más imprecisas.

Las parcelas donde se evaluó los prototipos presentaron valores de conductividad eléctrica en un rango entre 0,1 y 0,5 dS/m, lo que los cataloga como suelos no salinos. Según Dalton (1992) la sobrestimación ocurre cuando los valores de CE superan 8 dS/m, mientras que Wyseure et al. (2005) determinaron que el error era aceptable en niveles de CE menores a los 2 dS/m, y que la sobrestimación de la lectura de contenido volumétrico inferiores pueden despreciarse. Sin embargo, la salinidad medida como CE es una variable que debe ser incluida en las curvas de calibración, como se demostró en este estudio. La inclusión de la CE como variable explicativa incrementó hasta en 11 puntos porcentuales la capacidad del modelo de explicar la variación en humedad del suelo ( $R^2$ ).

Las curvas de calibración sugieren que al incrementar la temperatura del suelo los modelos sobrestiman el contenido volumétrico de agua. Cada 1 °C adicional de temperatura en el suelo, aumentó la estimación del contenido volumétrico de humedad entre 0,19 % y 0,52 %. Esto es consistente con el estudio de Oates et al. (2017), donde indican que el aumento en la temperatura del suelo incrementa la capacitancia medida por el sensor y por ende, sobrestima la humedad. Esto difiere con lo encontrado en el estudio de Zhu et al. (2019), donde aseguran en su estudio de evaluación de sensores FDR en suelos de textura fina y gruesa, que los sensores exhibieron sensibilidad sustancial a los incrementos de temperatura del suelo, al subestimar en 0,034 % ( $m^3/m^3$ ) el contenido de humedad volumétrico por cada 1 °C adicional. Por ende, la influencia de cambios en la temperatura del suelo en la precisión de sensores difiere entre las clases texturales y tipo de sonda. Se sugiere que los sensores deben incluir detector de temperatura para realizar una corrección de la influencia de este factor (González-Teruel et al., 2019).

La inclusión la CE y temperatura del suelo en el desarrollo de las curvas de calibración incrementó la capacidad predictiva de los modelos, con aumentos entre un 2 % y 11 % del  $R^2$  para todos los sensores de las Parcelas de la Vega. Por lo que, se sugiere que las curvas de calibración de sensores de humedad de suelo sean realizadas en las condiciones donde operara el dispositivo y no utilizar las calibraciones proporcionadas por los fabricantes. En un estudio se evaluó el ajuste de ecuaciones de calibración desarrolladas por las empresas que fabrican sensores de humedad en condiciones de campo y se determinó que cada sensor necesita de una ecuación de calibración única que contemple tipo de suelo (Varble & Chávez, 2011).

## Conclusión

El prototipo más exacto fue el prototipo A, mientras que el más preciso fue el prototipo B. El prototipo A fue la mejor alternativa al considerar precisión, exactitud y costo. Las curvas de calibración estimadas demostraron que los prototipos sobrestimaron las medidas del contenido de humedad volumétrico al presentarse valores mayores de conductividad eléctrica y temperatura, y que, por lo tanto, su estimación es necesaria al instalar los dispositivos.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al apoyo financiero del Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO) para el desarrollo del presente documento. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista de FONTAGRO, de su Consejo Directivo, ni de los países que representa. La investigación y desarrollo de este trabajo fueron posibles en parte gracias al apoyo de la Fundación Nippon. El contenido es responsabilidad del autor y no refleja necesariamente los puntos de vista de la Fundación Nippon.

## Referencias

- Adeyemi, O., Norton, T., Grove, I., & Peets, S. (2016). *Performance evaluation of three newly developed soil moisture sensors*. (pp. 26–29). Proceedings of the CIGR-AgEng Conference. <https://lirias.kuleuven.be/1717272?limo=0>
- Avendaño-Ruiz, B. D., Hernández-Alcantar, M. L., & Martínez-Carrasco-Pleite, F. (2017). Innovaciones tecnológicas en el sector hortícola del noroeste de México: rapidez de adopción y análisis de redes de difusión. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 495–511. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num3\\_art:740](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:740)
- Dalton, F. N. (1992). Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. In G. C. Topp, W. D. Reynolds, & R. E. Green (Eds.), *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice* (pp. 143–167). Soil Science Society of America, Inc. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub30.c8>
- Datta, S., Taghvaeian, S., Ochsner, T. E., Moriasi, D., Gowda, P., & Steiner, J. L. (2018). Performance assessment of five different soil moisture sensors under irrigated field conditions in Oklahoma. *Sensors*, 18(11), Article 3786. <https://doi.org/10.3390/s18113786>
- Escobar, G. (2016). *La relevancia de la agricultura en América Latina y el Caribe*. Friedrich Ebert Stiftung. <https://static.nuso.org/media/documents/agricultura.pdf>
- Feng, G., & Sui, R. (2020). Evaluation and Calibration of Soil Moisture Sensors in Undisturbed Soils. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 265–274. <https://doi.org/10.13031/trans.13428>
- Gonzalez Ortiz, C. F. (2020). *Evaluación de un nuevo sensor de humedad de suelo inalámbrico de bajo costo* [Tesis de maestría, Universidad de Talca]. DSpace Biblioteca Universidad de Talca. <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/12336>
- González-Teruel, J. D., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P., Toledo-Moreo, A. B., Jiménez-Buendía, M., & Soto-Valle, F. (2019). Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. *Sensors*, 19(3), Article 491. <https://doi.org/10.3390/s19030491>
- International Atomic Energy Agency. (2008). *Field estimation of soil water content. A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology* (Training Course Series No. 30). International Atomic Energy Agency. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-30\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-30_web.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate change 2014. Impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386>

- Lekshmi, S. S., Singh, D. N., & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, *54*, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Lemi, T., & Hailu, F. (2019). Effects of climate change variability on agricultural productivity. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, *17*(1), Article 555953. <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2019.17.555953>
- Meter Group. (n.d. a). *Teros 12: Advanced soil moisture sensor + temperature and EC*. Recuperado Octubre 10, 2022, de <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/teros-12-soil-moisture-sensor>
- Meter Group. (n.d. b). *Teros 21 soil water potential sensor*. Recuperado Octubre 10, 2022, de <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/teros-21-soil-water-potential-sensor>
- Mittelbach, H., Lehner, I., & Seneviratne, S. I. (2012). Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology*, *430–431*, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.041>
- Oates, M. J., Fernández-López, A., Ferrández-Villena, M., & Ruiz-Canales, A. (2017). Temperature compensation in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. *Agricultural Water Management*, *183*, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.002>
- Robinson, D. A. (2009). Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology. *Soil Science Society of America Journal*, *73*(4), 1437–1437. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0016br>
- Sugita, M., Kubota, A., Higuchi, M., Matsuno, A., & Tanaka, H. (2016). Continuous soil moisture monitoring under high salinity conditions by dielectric sensors: A reliability test. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, *12*, 17–22. <https://tsukuba.repo.nii.ac.jp/records/39994>
- Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). *Tecnologías digitales en la agricultura y las zonas rurales*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca4887es>
- Usuga, L., & Pauwels, V. (2008). Utilización de sensores de humedad para la determinación del contenido de humedad del suelo: ecuaciones de calibración. *Suelos Ecuatoriales*, *38*(1), 24–33. <http://hdl.handle.net/1854/LU-667649>
- Varble, J. L., & Chávez, J. L. (2011). Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management*, *101*(1), 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.09.007>
- Wyseure, G. C. L., Mojid, M. A., & Malik, M. A. (2005). Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. *European Journal of Soil Science*, *48*(2), 347–354. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00555.x>
- Zhu, Y., Irmak, S., Jhala, A. J., Vuran, M. C., & Diotto, A. (2019). Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil temperature effects in fine- and coarse-textured soils. *Applied Engineering in Agriculture*, *35*(2), 117–134. <https://doi.org/10.13031/aea.12908>