Digitalización de la agricultura de pequeña escala (AgTech 19043)

Producto 6: Nota técnica de pruebas piloto

Aquileo González, Luis Sandoval, Oriana Gómez, Brian Caro y Hugo Dorado

2022

FONTAGRO

Códigos JEL: Q16, Q25, N56

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus directorios ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Aquileo González, Luis Sandoval, Oriana Gómez, Brian Caro y Hugo Dorado

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:
FONTAGRO
Correo electrónico: fontagro@fontagro.org
www.fontagro.org

Tabla de Contenidos

Contenido

Lista de Cuadros 3
Lista de Gráficos 3
Glosario 4
Resumen 5
Prototipos a evaluados 6
Sistema de Referencia 6
Área de Estudio 6
Plan Piloto 7
Recolección de los datos 7
Análisis cuantitativo 7
Comportamiento según tipo de suelo 10
Comportamiento entre prototipos 11
Análisis cualitativo 12
Ranqueo y selección final 12
Instituciones participantes 14

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Resultados del análisis de suelo de los lotes. 7
Cuadro 2. Estadística descriptiva de la diferencia de la medición de humedad de suelo expresado en volumen de agua por volumen de suelo (%). 8
Cuadro 3. Resultados del prototipo B. 9
Cuadro 4. Resultados de los análisis de regresión. 10
Cuadro 5. Ranqueo por criterios. 13

Lista de Gráficos

Gráfica 1. Regresiones por tipo de suelo. 11

Glosario

Dispositivo: Aparato o equipo.

Encapsulado: Aparato o equipo que contiene en su interior elementos electrónicos para protegerlos de daño físico o corrosión y evacuar el calor generado en su funcionamiento, también permitirle la comunicación con el exterior mediante la conexión de un sensor de medición.

Exactitud: Capacidad de un dispositivo de tomar una medición muy cercana a la real.

Pruebas piloto: Pruebas preliminares en campo de un equipo electrónico u otro tipo de herramienta.

Registro de datos: Escritura de datos y mediciones en un elemento físico como una memoria de almacenamiento.

Resistencia: Oposición o dificultad al paso de la corriente eléctrica.

Sonda o sensor: Herramienta de medición de determinada variable como la humedad del suelo.

Tiempo de respuesta: Tiempo que tarda un sensor en tomar una medición y retornar el valor medido a la etapa de registro/almacenamiento.

Contenido volumétrico del agua: proporción del volumen de agua en el sustrato dividido por el volumen total del recipiente.

Capacitancia: capacidad de un componente o circuito para recoger y almacenar energía en forma de carga eléctrica.

Granulometría: Estudio de la distribución estadística de los tamaños de una colección de elementos de un material sólido fraccionado o de un líquido multifásico.

Presencia Radicular: Conjunto de raíces de una misma planta.

Precisión: Ajuste completo o fidelidad de un dato, cálculo, medida, expresión, entre otros.

Resumen

El proyecto “Digitalización de la Agricultura de Pequeña Escala” reúne academia, investigación y empresa privada con el objetivo de llevar la revolución de la agricultura 4.0 a los pequeños agricultores de la región, a través de un dispositivo para medir humedad de suelo, encapsulado, económico, robusto y de alta usabilidad.

Dentro de las actividades metodológicas necesarias para obtener una versión comercializable del dispositivo planteado, se ha desarrollado un proceso de prototipaje para comparar los tres prototipos o modelos del dispositivo. Cada prototipo está compuesto por: a) un dispositivo robusto y encapsulado, que se pueda enterrar en el suelo para el registro de datos y el suministro de energía de la sonda de humedad de suelo, b) una sonda o sensor de humedad, cuyas características de la tecnología propuesta permitirían sustituir varios de los componentes tradicionalmente usados para almacenamiento y registro de mediciones y c) un sistema de carga, almacenamiento y administración de energía.

Se realizaron cinco réplicas de cada uno de los prototipos, con el fin de someterlos a la etapa de pruebas piloto en campo, para validar su funcionalidad y respuesta en condiciones reales de uso e implementación. Esta nota técnica discute la metodología de pilotaje de los prototipos en condiciones de campo reales, para determinar su desempeño. Se muestran los resultados de las pruebas piloto, se discuten los criterios de evaluación y finalmente se indica cual es el prototipo con mejor desempeño.

Palabras clave: agricultura 4.0, sensor de humedad, SoilWatch10, Pinotech.

Prototipos a evaluados

Se evaluó tres prototipos de dispositivos de medición y registro de humedad de suelo. La descripción completa del diseño de los prototipos se encuentra disponible en el **Producto 4** de este mismo proyecto. Los prototipos evaluados fueron:

1. Prototipo A: datalogger + 1 sensor SoilWath10 de PinoTech
2. Prototipo B: datalogger + 1 sensor SS200 de Irrometer
3. Prototipo C: datalogger + 1 sensor ECH2O EC-5 de Meter

Sistema de Referencia

Los sensores Teros 12 y Teros 21 de METER Group fueron identificados como los sensores de referencia contra los cuales se comparó los prototipos desarrollados. Estos sensores son de alta confiabilidad y han sido ampliamente adoptados en agricultura. Ambos sensores fueron acoplados a un dispositivo de carga, almacenamiento y administración de energía diseñado por Visualiti y actualmente utilizados a escala comercial.

Los datos obtenidos de los sensores de referencia fueron utilizados para corroborar el correcto funcionamiento de los prototipos y como valores de referencia para la validación y estimación de ecuación de calibración de los prototipos.

Área de Estudio

Los prototipos se sometieron a pruebas de campo en parcelas identificadas por los investigadores del proyecto procurando: (1) fácil acceso y monitoreo de la parcela, (2) diversidad de texturas de suelo y (3) diversidad de cultivos. Se estableció una parcela en Colombia y cuatro en Honduras. La mayoría de las parcelas se colocaron en Honduras ya que los resultados de esta prueba piloto fueron usados en una tesis de la Maestría en Agricultura Tropical Sostenible de Zamorano. La parcela en Colombia se utilizó para que el equipo local pudiera replicar el ensayo y obtener datos primarios.

La parcela de prueba en Colombia se localizó en una finca cafetalera ubicada en Cerrillos Popayán, Valle del Cauca, Colombia. En Honduras, se instaló tres parcelas en el lote La Vega, en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana, y una parcela en un lote de la finca Agroecológica de Zamorano, ambos ubicados en el Valle del Yeguare, Francisco Morazán, Honduras. Al momento

del piloto, el lote de La Vega se encontraba sembrado con frijol (*Phaseolus vulgaris*) y el lote de la finca agroecológica con maíz (*Zea mays*). A continuación, se muestran las características de suelo de cada parcela (Cuadro 1).

Cuadro 1. *Resultados del análisis de suelo de los lotes.*

Lote	Textura	g/100g			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	--	--	--	--	--	--

M.O. = Materia Orgánica.

Plan Piloto

El objetivo de plan piloto fue definir las variables a medir y condiciones de campo deseables para evaluar el desempeño de los prototipos al compararlos con un dispositivo de referencia. A continuación, se describen las variables consideradas y distribución de las réplicas de los prototipos.

Recolección de los datos

Se realizó una única recolección de los datos y revisión de los prototipos al finalizar cada uno de los períodos de prueba. El período de prueba dependió de la etapa del ciclo de cultivo en que se instaló cada estación piloto. Debido a la característica de los dispositivos de no contar con conexión remota, se realizó una extracción manual de los datos mediante el apagado de los dispositivos y retiro de la memoria microSD.

Análisis cuantitativo

El objetivo del análisis cuantitativo fue evaluar la exactitud y precisión de las medidas de humedad de suelo de los prototipos con respecto a la medida de humedad de suelo de los sensores de referencia.

Estadística descriptiva. Se presenta de forma tabular y gráfica los datos obtenidos con los

prototipos y sensores de referencia. Específicamente se calculó:

1. Distribución de la diferencia de las mediciones del prototipo versus el control.
2. Frecuencia porcentual de las medidas de los prototipos con respecto a los sensores de referencia. Esto permite identificar la continuidad de las mediciones.

A continuación, se muestra la estadística descriptiva de las medidas de los prototipos A y C (Cuadro 2) y prototipo B (Cuadro 3).

Cuadro 2. Estadística descriptiva de la diferencia de la medición de humedad de suelo expresado en volumen de agua por volumen de suelo (%).

Parcela	Prototipo	N	Diferencia media*	Desviación estándar	Frecuencia porcentual
Cerrillos Popayan	A	1342	-6.18	1.41	100
	C	1342	11.14	1.42	100
La Vega: arena 32%	A	775	-1.389	0.896	100
	C	775	6.903	1.402	100
La Vega: arena 40%	A	810	-1.24	1.804	100
	C	621	1.84	1.085	77
La Vega: arena 26%	A	810	-4.218	1.096	100
	C	810	9.081	0.722	100
Finca Agroecológica	A	1153	-13.708	0.937	100
	C	1153	5.472	0.539	100

*Diferencia media y desviación estándar expresados en puntos porcentuales usando valor de prototipo menos valor de referencia.

Cuadro 3. Resultados del prototipo B.

Parcela	Prototipo	N	Diferencia media	Desviación estándar	Frecuencia porcentual
Cerrillos Popayan	B	-	-	-	-
La Vega: arena 32%	B	775	-59.473		100
La Vega: arena 40%	B	810	-174.302		100
La Vega: arena 26%	B	810	-20.73		100
Finca Agroecológica	B	1003	-1.943		87

Pruebas t. Se realizaron pruebas t emparejadas para evaluar la exactitud de las medidas de cada uno de los prototipos contra su medición de referencia. Se evaluó la hipótesis de:

$$H_0: \mu_{diferencia} = 0$$
$$H_a: \mu_{diferencia} \neq 0$$

Donde rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna sugiere que los prototipos no fueron exactos en las medidas de humedad de suelo.

Se rechazó la hipótesis de igualdad de la media de la diferencia a cero en todas las comparaciones ($p < .001$). Por lo tanto, se concluye que ninguno de los prototipos fue exacto con respecto al sensor de referencia. Es importante destacar que, a pesar de que se tuvieron todas las consideraciones posibles para igualar la condición en la que se instalaron los sensores, era natural esperar diferencias en las medidas. Adicionalmente, con más de 800 observaciones para todas las comparaciones, es inevitable encontrar diferencias estadísticamente significativas, por lo que se recurrió a la experiencia de los investigadores para determinar si las diferencias eran prácticas. El equipo de investigadores concluyó que las diferencias no son prácticas y que las sondas se comportaron según lo esperado.

Análisis de regresión. Se realizaron análisis de regresión para evaluar la precisión de las medidas de cada uno de los prototipos. Los modelos estimados fueron:

$$Humedad\ de\ suelo_{referencia} = \beta_0 + \beta_1 Humedad\ de\ suelo_{prototipo}$$

Donde el coeficiente de correlación de Pearson, ρ, fue utilizado como una medida de la precisión

de las medidas. A mayor coeficiente de correlación de Pearson, más precisa la medida del prototipo. Si bien se pudo únicamente haber hecho un análisis de correlación ente la medida de humedad de suelo de cada prototipo y su medida de referencia, la ecuación estimada puede ser utilizada para calibrar la medida de los prototipos utilizando la medida de referencia como el verdadero valor de humedad de suelo. Además, el coeficiente de determinación de la regresión (R^2) indica el porcentaje de la variación en la medida de referencia, explicada por la medida del prototipo. En ambos casos, valores más altos de los coeficientes, sugieren más precisión de la medida. Los resultados de los análisis de regresión se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Resultados de los análisis de regresión.

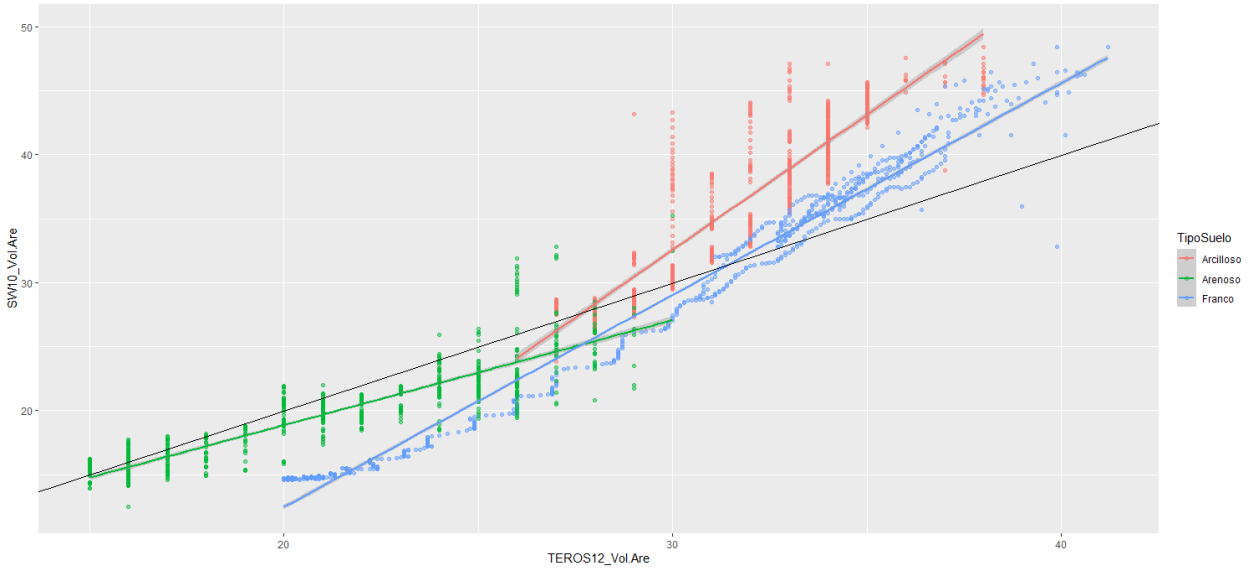
Parcela	Prototipo	R	R^2	RMSE	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$
Cerrillos Popayán	A	0.78	0.60	0.537	14.364	0.807
	B	-	-	-	-	-
	C	0.78	0.62	0.527	-1.434	0.837
La Vega: arena 32%	A	0.990	0.979	0.896	12.839	0.591
	B	0.950	0.903	28.079	78.006	5.191
	C	0.974	0.949	1.402	4.539	0.684
La Vega: arena 40%	A	0.896	0.803	1.804	1.679	0.977
	B	0.949	0.901	84.679	95.247	7.783
	C	0.950	0.903	1.085	3.351	0.638
La Vega: arena 26%	A	0.925	0.856	1.096	17.028	0.405
	B	0.942	0.888	17.072	27.541	3.230
	C	0.968	0.937	0.722	15.915	0.384
Finca Agroecológica	A	0.837	0.701	0.937	17.737	0.763
	B	0.804	0.646	14.18	11.346	2.073
	C	0.949	0.901	0.539	14.77	0.440

Comportamiento según tipo de suelo

Se observo que los tres prototipos evaluados presentaron una mejor precisión o ajuste a la regresión lineal en el suelo 32% de arena, donde todos obtuvieron un ajuste superior a 0.95

(R^2=0.95). Seguido, del suelo 26% de arena con valores superiores a 0.92 (R^2=0.92). Las parcelas donde se encontró un menor ajuste de los sensores fue en los suelos que presentan mayores contenidos de arena: La Vega Arena 40% y Finca Agroecología (64% de arena), con un ajuste de R^2 de 0.80 y 0.70 respectivamente. Esto concuerda con los hallazgos encontrados en estudio de Acevedo (2020) donde se observó que sensores FDR de bajo costo presentaban un mayor ajuste en suelos Arcillosos y Francos, con respecto a los suelos de texturas gruesas (Arenosos).

Para ejemplificar como las propiedades fisicoquímicas del suelo afectan la lectura de los sensores, en la Gráfica 1 se muestra un gráfico de dispersión con la sonda de referencia en el eje horizontal y el prototipo A en el eje vertical. Separado por color se muestran los puntos según tipo de suelo, y la línea diagonal negra delimita donde hubiera sido igual la lectura de las sondas (Gráfica 1). Como se puede observar, dependiendo del tipo de suelo y contenido de humedad, la sonda del prototipo A, sobreestimo o subestimo la medida del sensor de referencia.



Gráfica 1. Regresiones por tipo de suelo.

Comportamiento entre prototipos

Dentro de la evaluación de los tres prototipos se determinó que, en cuatro de los cinco sitios evaluados, el prototipo C presenta un mejor ajuste a la regresión lineal con valores superiores al 0.9 (R^2=0.9), a excepción de la parcela Cerrillos Popayán donde se obtuvo un valor de 0.62 (R^2=0.62). En la parcela restante La Vega arena 32% el prototipo A fue el que presento un mejor

ajuste a la regresión lineal con un valor con un valor de 0.98 (R^2=0.98). Por lo tanto, dentro del criterio de precisión, el prototipo que presentó un mejor comportamiento fue el prototipo C. A pesar de que es el prototipo C el que presenta un mejor ajuste en la mayoría de las parcelas evaluadas, los ajustes del prototipo A se encuentran cerca de los valores de este.

Análisis cualitativo

El análisis cualitativo consistió en una inspección visual de los prototipos para evaluar: (1) resistencia del conector IP del sensor al desgaste y (2) resistencia de la carcasa exterior a la corrosión y la intemperie. A los dos meses de haber finalizado el ensayo de campo no se encontró danos ni corrosiones en los dispositivos que significaran preocupación para el grupo de investigadores.

Ranqueo y selección final

Finalmente, para determinar el mejor sensor a replicar, se ranqueo los prototipos en tres categorías: precisión, exactitud y análisis económico. Se seleccionó como el mejor sensor el que tuvo la sumatoria más baja de los tres criterios. Esto implica que un sensor pudo haber sido el mejor evaluado en uno de los criterios, pero no el mejor en general (Cuadro 5).

Se seleccionó el prototipo A, con la sonda Soil Watch 10 (SW-10), como la mejor alternativa para replicar. El prototipo A fue el más exacto y económico, y fue segundo en precisión.

Cuadro 5. Ranqueo por criterios.

Modelo de dispositivo (Prototipo)	**A**	**B**	**C**
Sensor	**SW-10**	**SS200**	**ECH20-EC5**
Resultado de análisis de medida de precisión (1: mejor desempeño)	2	3	1
Resultado de análisis de medida de exactitud (1: mejor desempeño)	1	3	2
Resultado análisis económico (1: menor costo)	1	2	3
Sumatoria	4	8	6
Puntaje	1.33	2.67	2

Puntaje: Valores cercanos a 1, presentan un mejor desempeño.

Instituciones participantes

Secretaría Técnica Administrativa

FONTAGRO

Con el apoyo de:

BID
Banco Interamericano de Desarrollo

IICA

www.fontagro.org
Correo electrónico: fontagro@fontagro.org