

# Desarrollo y validación de un dispositivo para determinar la infiltración de agua en suelos de agostaderos



## Colaboración

Ángel David Záizar González; Darío Cisneros Arreola; Merit Cisneros González; Manuel Ismael Mata Escobedo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana

Fecha de recepción: 03 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 13 de febrero de 2026

Autor de Correspondencia: Ángel David Záizar González

**RESUMEN:** La infiltración del suelo es uno de los factores más importantes en el desarrollo y en la sustentabilidad de pastizales, para su estudio existen dispositivos como los infiltrómetros, sin embargo con el pasar de los años no se han actualizado con las nuevas tecnologías siendo dispositivos bastante demandantes en cuanto a su utilización y manejo. El presente trabajo consiste en el desarrollo y validación de un infiltrómetro, con el objetivo de proporcionar una herramienta económica, eficiente y adaptable a cualquier tipo de suelo de agostadero mediante la implementación de un sistema electrónico que permite su automatización con un microcontrolador. El dispositivo fue validado en suelos de agostaderos de la Hacienda San Lorenzo en 3 sitios donde se obtuvieron parámetros de velocidad de infiltración ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) e infiltración acumulada (L). Los resultados demostraron la autonomía y practicidad del infiltrómetro, así como su adaptabilidad a suelos pedregosos.

**PALABRAS CLAVE:** Agricultura, Electrónica, Infiltrómetro, Internet de las Cosas, Sensor Ultrasónico.

**ABSTRACT:** Infiltration is one of the main factors in the development and sustainability of grasslands, devices such as infiltrometers are available for its study. However, infiltrometers have not been updated with new technologies in the past years, although being quite demanding in its use and handling. The present work consists in the development and validation of an infiltrometer. The objective is to provide an economic, efficient and adaptable tool to any type of rangeland through the implementation of an electronic system that allows its automation with a microcontroller. The device was validated in three sites within the rangelands of Hacienda San Lorenzo. It obtained the parameters of infiltration rate ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) and cumulative infiltration (L). The results showed the autonomy and practicality of the infiltrometer, as well as its adaptability to stony soils.

**KEYWORDS:** Agriculture, Electronic, Infiltrometer, Internet of Things, Ultrasonic Sensor.

## INTRODUCCIÓN

Los pastizales son la fuente principal de alimento del ganado bovino y en el mundo hay alrededor de 1,887,712,280 ha de acuerdo con FAO [1]. Asimismo, en México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó en el 2014 que alrededor del 40 % de los pastizales se encuentran en condiciones deplorables, principalmente esto se debe a la mala administración del ganado y el nulo conocimiento sobre el estado del suelo [2]. De los principales factores altamen-

te relacionados a la calidad de suelos de agostaderos son la infiltración y la retención del agua, que permiten conocer el verdadero aprovechamiento del agua de lluvia, y a la vez, saber si hay pérdidas por escurrimiento y evaporación que influyen significativamente en el desarrollo de biomasa y en la calidad del suelo.

El desarrollo de nuevas tecnologías como el internet de las cosas (IoT) permite el monitoreo y la recopilación de datos mejorando la interacción entre dispositivos y procesos con el usuario, por consecuencia, ha tenido repercusión en distintas áreas de la industria así como en el campo. La agricultura de precisión (AP) consiste en la implementación de sistemas de geolocalización y monitoreo del campo, con la automatización y optimización de diversos procesos y tareas, como tractores con sistemas de conducción automática, drones fertilizadores o sistemas de detección de plagas, permitiendo al sector industrial cubrir la alta demanda de alimento de origen vegetal [3-6].

Para el estudio de la infiltración del suelo existen técnicas y dispositivos para determinar su comportamiento y uno de los más comunes son los infiltrómetros, que simulan el comportamiento del agua de lluvia mediante el registro del nivel del agua en distintos intervalos de tiempo. Sin embargo los infiltrómetros comerciales además de carecer de nuevas tecnologías que permitan la optimización del estudio, son inaccesibles para el ganadero local por sus altos costos.

Investigadores como Abdelmoneim et al. [7]; Latorre et al. [8] y Blanco-Gomez et al. [9] desarrollaron infiltrómetros de doble anillo (infiltrómetro de Müntz), disco de tensión y anillo único respectivamente, con un sistema de IoT con el objetivo de recopilar y manejar la información de manera eficiente. Utilizaron sensores de presencia, cámaras y sensores ultrasónicos para medir el nivel del agua. Los prototipos demostraron buena viabilidad y mejor eficiencia respecto a los procesos de medición utilizados en métodos convencionales.

Este dispositivo a diferencia de los prototipos mencionados, presenta adecuaciones tanto en estructura como en electrónica que permiten mejorar su eficiencia, portabilidad y capacidad de operar en suelos de agostaderos duros y de alta pedregosidad.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Metodología

Para el desarrollo y validación de este prototipo se consideraron las siguientes etapas: elaboración del infiltrómetro, área de estudio y pruebas de campo.

### Elaboración del infiltrómetro

#### Estructura

La estructura del infiltrómetro está conformada por 2 anillos concéntricos; el anillo central (pluviómetro) permite medir el grado de infiltración del agua en

suelo y está constituido por un tubo de PVC hidráulico de 16 cm de diámetro y 45 cm de altura; el anillo exterior (cilindro de inundación) satura el suelo que rodea al anillo central que está constituido por una cubeta de pintura con base mayor de 30 cm de diámetro, base menor de 27 cm de diámetro y un altura de 36 cm, permitiendo que el agua baje de forma recta y evitando desviaciones de la misma en distintas capas del suelo, por lo tanto el comportamiento del agua capturado por el pluviómetro tiene un mayor grado de confiabilidad (Figura 1).

Asimismo, la implementación de estacas y bases de acero en ambos anillos permite una mejor penetrabilidad en todo tipo de suelo. Las estacas son varillas de  $\frac{1}{2}$ " con una longitud de 20 cm con una base triangular para tener un área de impacto mayor al momento de la instalación en el agostadero. Estas fueron soldadas a una base metálica elaborada con solera de  $\frac{1}{4}$ " que cuenta con un anillo de alambro de 5 cm de grosor el cual da soporte a la parte plástica de los anillos (Figura 2 y 3).

### Sistema de adquisición de datos (DAQ)

Para el DAQ se utilizó el ESP-32 DevKit v1, un micro controlador (uC) de fácil manejo y bajo costo. Está conformado por una memoria Flash de 4 MB, SRAM de 500 KB, procesador de 32 bits, más de 20 pines de entrada/salida (I/O) y cuenta con conectividad inalámbrica por medio de Bluetooth y Wifi. Gracias a ello, el prototipo cuenta con la capacidad de realizar múltiples funciones y mantener comunicación a distancia con el usuario.

### Composición del DAQ

El DAQ está conformado por distintos componentes y dispositivos electrónicos de bajo costo, asimismo cuenta con el uso de un uC y de una memoria microSD, los cuales permiten el almacenamiento de información en una unidad de memoria física y, al mismo tiempo, el monitoreo del comportamiento del nivel de agua vía internet.

Para la alimentación de todo el circuito fue necesario el uso de una fuente de voltaje, se utilizaron 4 pilas Li-Ion 18650 que proporcionan un voltaje nominal de 3.7 V y un amperaje de 2200 mAh, se colocaron en un arreglo en serie para alcanzar un voltaje mayor de 14 V, con el objetivo de mantener el dispositivo en funcionamiento por más de 10 h debido a que la técnica propuesta por Klute (1986) [10] que especifica la necesidad de mantener la prueba constante en un lapso aproximado a 5 h siendo esto una limitante para la implementación de dispositivos electrónicos cuando es necesario realizar más de una prueba. Para el abastecimiento de agua fue necesario el uso de una bomba de agua que funciona con 12 V y 800 mAh, por lo tanto se implementó un módulo Step-Down MP1584 para ajustar la alimentación a 12 V fijos. Asimismo, regular 5 V para la alimentación del uC y los demás componentes conectados a este.



Figura 1. Estructura infiltrómetro.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Fabricación de base metálica.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Unión base metálica con parte plástica.  
Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el nivel de agua en el pluviómetro fue necesario conocer la velocidad a la que el suelo absorbe el agua, para ello es importante el uso del sensor Grove Ultrasonic Ranger v2.0, el cual es un sensor ultrasónico de bajo costo con una alimentación de 3.3 V, buena precisión y un alcance de 3.5 m, que permite conocer la distancia a la que se encuentra el nivel del agua respecto a un punto fijo, por lo tanto al conocer los intervalos de tiempo es posible determinar la velocidad a la que el suelo absorbe el agua, como se demuestra en la siguiente ecuación:

$$v_{i,j} = \frac{(d_i - d_j)}{t_{i,j}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $v_{i,j}$  es la velocidad entre el intervalo  $i$  y  $j$  (cm/s);  $d$  es la distancia obtenida por el sensor (cm);  $t_{i,j}$  es el tiempo transcurrido entre las lecturas de los intervalos  $i$  y  $j$  (s).

### Instalación del DAQ

La adaptación del DAQ al infiltrómetro se llevó a cabo mediante el desarrollo de fixturas que fueron realizadas mediante FreeCAD que es un software de dibujo asistido por computadora, posteriormente fueron materializadas por medio de la impresión 3D, por ello se trabajó con la impresora Ender 3 V2 de la marca Creality. Como material de impresión se utilizó filamento PLA de 0.75 mm de diámetro de la marca Steren (Figura 4).

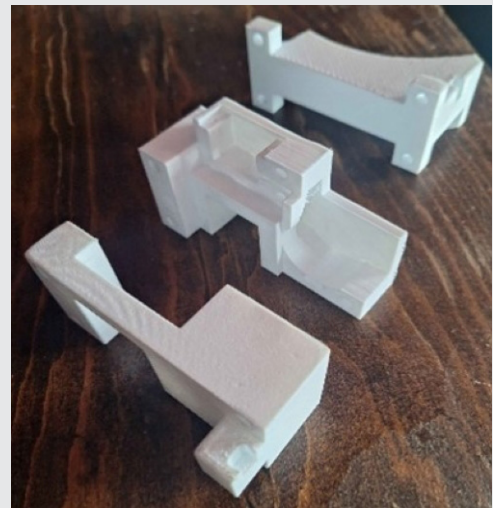


Figura 4. Fixturas impresas en 3D.  
Fuente: Elaboración propia.

El sistema al iniciar evalúa si el DAQ cuenta con una tarjeta microSD, con el fin de asegurar los datos que se recopilaran durante el estudio, de no contar con ella el sistema automáticamente se reinicia hasta que el usuario inserte una memoria microSD funcional. Asimismo, cuenta con una interfaz manejable mediante menús, donde es posible seleccionar si se desea iniciar el proceso de calibración o el estudio, este se puede realizar con o sin conexión a internet y de igual

forma seleccionar si se desea utilizar el sistema de bombeo (Figura 5).

Al iniciar el estudio el DAQ captura el nivel inicial de agua del pluviómetro y posteriormente espera un tiempo predefinido. Una vez suspendido o terminado el estudio, los datos de las lecturas y el cálculo de las variables velocidad de infiltración e infiltración acumulada son almacenados en la memoria microSD en un archivo tipo CSV.

La autonomía del infiltrómetro, conectividad y viabilidad de las lecturas son indispensables para que cualquier persona pueda realizar un estudio correcto del suelo, para ello se diseñó un sistema de auto-calibración y un sistema de monitoreo.

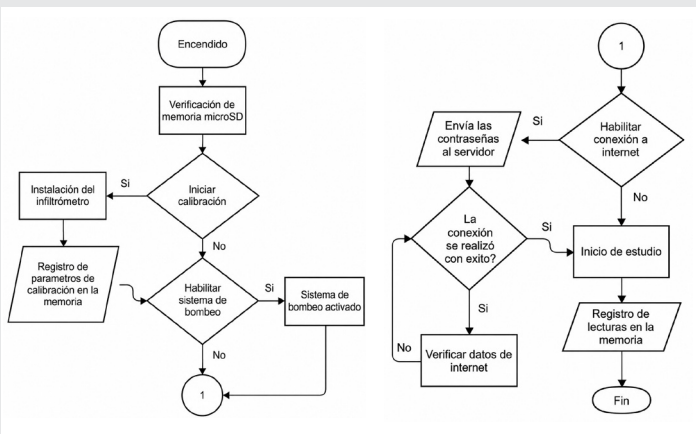


Figura 5. Diagrama de flujo sobre el funcionamiento del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

### Sistema de auto-calibración

El sistema de calibración consiste principalmente en la implementación de un motor a pasos 28BYJ-48 que genera el desplazamiento lineal de una referencia por medio de un mecanismo cremallera-piñón, permitiendo al DAQ mantenerse calibrado en todo momento. Para el algoritmo de calibración la referencia se desplaza en intervalos de 5 cm iniciando desde los 5 a los 35 cm respecto al sensor (Figura 6).

Para ajustar los datos obtenidos por el sensor a las distancias reales, se utilizó el método de mínimos cuadrados con las ecuaciones que se presentan a continuación [11]:

$$m = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$b = \bar{Y} - m\bar{X} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde  $m$  es la pendiente de la función;  $b$  es la ordenada de la función;  $Y$  son los valores reales (cm);  $X$  son las lecturas sin ajuste (cm);  $n$  es la cantidad de lecturas registradas.

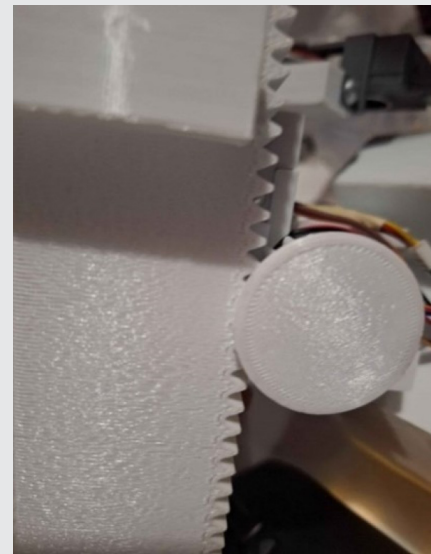


Figura 6. Mecanismo de auto-calibración.

Fuente: Elaboración propia.

### Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo se realizó para conocer en tiempo real el comportamiento del nivel del agua, mediante el uso de internet por medio de la plataforma ThingSpeak que es una plataforma en línea para la proyección de información recopilada entre dispositivos con aplicaciones de IoT y/o por un display LCD 4x20 con interfaz I2C (Figura 7). Con ello se puede comprobar si el funcionamiento del sensor es correcto durante el proceso de calibración o durante el estudio.

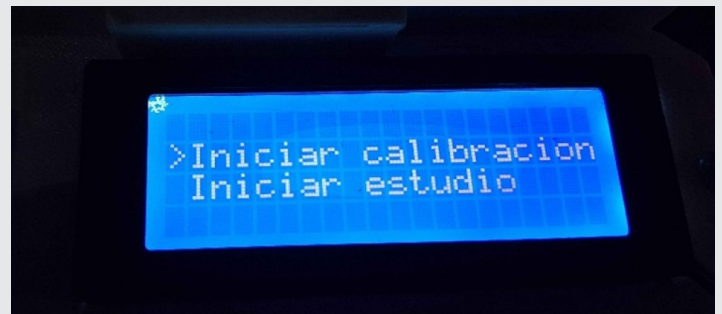


Figura 7. Display LCD 4x20.

Fuente: Elaboración propia.

### Área de estudio

La prueba se desarrolló en suelos de agostadero de la Laguna San Lorenzo, ubicada cerca de la Hacienda San Lorenzo por la carretera de Durango al Mezquital Km 13 del estado de Durango, México. Con temperatura promedio anual de 18 °C y una precipitación promedio de 500 mm.

### Pruebas de campo

Se instalaron infiltrómetros en 3 sitios próximos unos del otro (A, B y C), a los cuales se les retiró la cobertura vegetal. Posteriormente, los infiltrómetros fueron enterrados a 15 cm de la superficie del suelo (Figura 8).

El infiltrómetro del sitio C a diferencia de los otros 2, se le habilitó el sistema de bombeo que permitió el llenado constante del infiltrómetro entre los tiempos de lectura evitando así la necesidad de realizar un abastecimiento manual de agua (Figura 9). Los 3 infiltrómetros fueron observados con regularidad para asegurar su correcto funcionamiento durante las 3 h y 18 minutos que duró el estudio, donde se obtuvieron 13 lecturas.



Figura 8. Instalación de infiltrómetros.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Infiltrómetro del sitio C con sistema de bombeo.  
Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento similar entre los sitios B y C en la velocidad de la infiltración como se muestra en la Figura 10 donde se aprecia como el agua se infiltra rápidamente en el suelo hasta llegar a un punto de saturación en el intervalo de los 10 y 20 minutos, asimismo se observó una velocidad máxima (72.47; 60,  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) y mínima bastante similar (5.92; 6.48,  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ). El sitio A alcanza esa saturación por primera vez en el minuto 4, y posteriormente logra sobrepasar una capa del suelo para nuevamente llegar a un punto de saturación entre los 30 y 35 minutos. Esto se debe principalmente a que este sitio fue el que presentó un mayor grado de humedad el cual era notable desde la primera capa del suelo como se aprecia en la Figura 11, debido a las lluvias que se presentaron con regularidad durante el mes de Agosto.

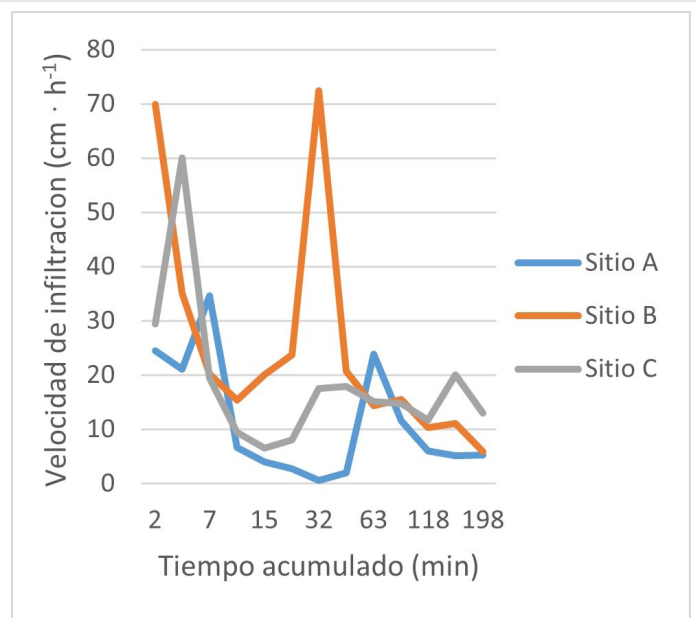


Figura 10. Velocidad de infiltración de los 3 sitios.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 11. Humedad del suelo en el sitio A.  
Fuente: Elaboración propia.

A consecuencia de la humedad del sitio A la infiltración acumulada también se vio afectada, donde el nivel del agua solamente se desplazó 26.68 cm (4.69 L) en total, a diferencia de los sitios B y C que contaron con una infiltración acumulada de 53.1 y 50.61 cm (9.34; 8.90, L) respectivamente como se muestra en la Figura 12.

El impacto del sensor Grove en el DAQ fue bastante positivo, debido a que mide la distancia a la que se encuentra el nivel del agua en un amplio rango y a tiempos preestablecidos, a diferencia del prototipo presentado por Abdelmoneim et al., (2021) que determina la velocidad de infiltración con sensores de presencia y por consecuencia el tiempo se ve sujeto a la respuesta de varios sensores que se pueden ver afectados por circunstancias ambientales como la materia orgánica que se puede encontrar en el suelo.

Asimismo el uso del sensor Grove es una alternativa mucho más económica en comparación al uso de la cámara de un Smartphone propuesta por Latorre et al., (2021). Sin embargo, al obtener mediciones analógicas se recomienda una verificación doble del nivel del agua al momento de utilizar un sistema de bombeo, esto debido a que al momento de abastecer el anillo central de agua existe la posibilidad de detectar erróneamente el nivel inicial.

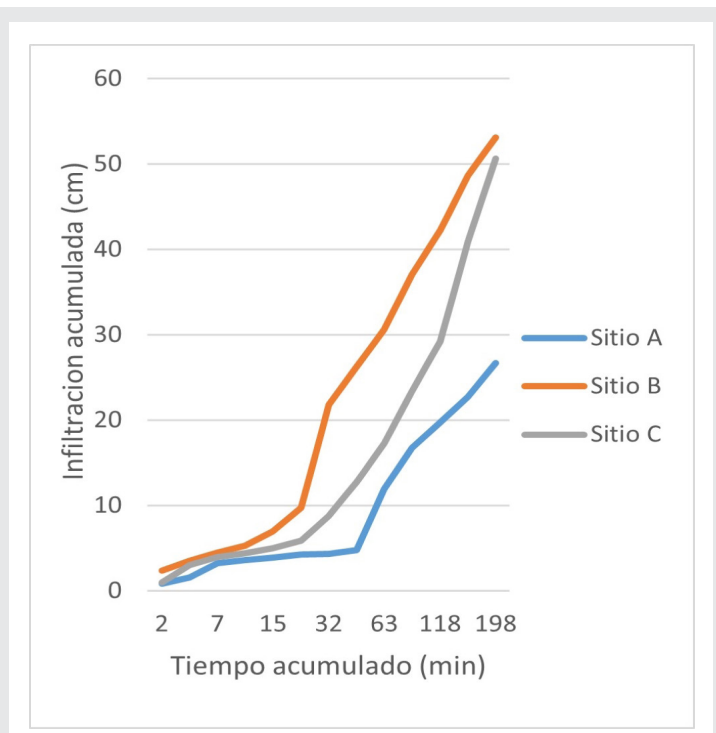


Fig. 12 Infiltración acumulada de los 3 sitios.

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

La implementación de las bases metálicas permitió una mejor y más fácil penetración del suelo, asimismo la adaptación del DAQ al infiltrómetro de anillos concéntricos simplificó significativamente la toma de lec-

turas y el análisis de datos que se realiza generalmente en lluvias simuladas con infiltrómetros genéricos. Se recomienda cubrir con tierra la periferia del anillo de inundación para evitar posibles fugas en el anillo exterior, como las que se presentaron en la primera carga de los sitios A y B y por consecuencia el DAQ inició el registro de datos más tarde de lo esperado. Asimismo, en la aplicación del IoT se recomienda contar con un extensor de señal o estar ubicado en un área con buena recepción debido a que en el presente trabajo por la ubicación de los sitios estudiados no fue posible entablar conexión con el servidor de ThingSpeak.

## BIBLIGRAFÍA

[1] Fao. (2022). FAOSTAT. Obtenido el 21 de agosto de 2024, de la página electrónica: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/LC/visualize>

[2] Biodiversidad. (2022). Pastizales. Obtenido el 21 de agosto de 2024, de la página electrónica: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales>

[3] Tantan, J., Xiongze, H. (2024). Robotic arms in precision agriculture: A comprehensive review of the technologies, applications, challenges, and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 221.

[4] Gurumita, G., Ramesh, G. P. (2022). Mango leaf disease detection using ultrasonic sensor. En *IEEE International Conference on Data Science and Information*

*System (ICDSIS)* (pp. 1-5). Hassan, India.

[5] Ruiz, M. E., Garcia, R., Machado, N. (2024). Application of drones in international and Cuban agricultura. *Revista Ciencias Tecnicas Agropecuarias*, vol. 33, no. 1, Mayabeque, Cuba.

[6] Perez-Acosta, O. G., Mejias, A. (2024). Computer system for the energy potential determination in pig's Enterprise. *Cuban Journal of Agricultural Science*, vol. 58, Mayabeque, Cuba.

[7] Abdelmoneim, A. A., Daccache, A., Khadra, R., Bhanot, M., Dragonetti, G. (2021). Internet of Things (IoT) for double ring infiltrometer automation. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 188.

[8] Latorre, B., Moret-Fernández, D., Lyons, M. N., Palacio, S. (2021). Smartphone-based tension disc infiltrometer for soil hydraulic characterisation. *Journal of hydrology*, vol. 600.

[9] Blanco-Gómez, P., Mateu-Belloch, A., Jiménez-García, J. L., Salas-Cantarellas, A. J., Pieras-Company, J. J., Santamaria-Casals, E.

(2024). *Real-time ultrasonic water level IoT sensor for in-situ soil permeability testing*. *HardwareX*, vol. 19.

[10] Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. En *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America* (2), Madison, USA.

[11] Varsity Tutors. (2024). *Recta que mejor se ajusta (método de mínimos cuadrados)*. Obtenido el 21 de agosto de 2024, de la página electrónica: [https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath\\_help/spanish/topics/line-of-best-fit](https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath_help/spanish/topics/line-of-best-fit). *Science and Technology* 22, 1098-1104.

