

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Programa de Regionalización
Informe Final de proyectos Extensión**

Muestro y Análisis de Suelos de Áreas Productivas (Etapa II)

Eje estratégico:
Agua y Alimentos

Coordinador:
Dra. Natalia Gómez Calderón

Colaboradores:
Dra. Karolina Villagra Mendoza

Marzo, 2023

1. Tabla de contenido

1. Tabla de contenido	2
2. Código y Título del proyecto	3
3. Autores y direcciones:	3
4. Resumen	3
5. Abstract	3
6. Palabras clave y key words	4
7. Contextualización del proyecto	5
8. Estrategia de abordaje	6
9. Análisis de resultados.....	8
9.1 Resultados obtenidos.....	8
9.2 Resumen de consideraciones en las capacitaciones a los productores.	9
12. Cumplimiento del plan de difusión	12
14. Limitaciones y problemas encontrados	13
15. Observaciones generales y recomendaciones.....	13
16. Agradecimientos.....	13
17. Referencias	13
18. Apéndices	14
APÉNDICE 1. Mediciones de resistencias del suelo realizadas en cada punto de muestreo de la zona de estudio.....	15
APÉNDICE 2. Mapas de resistencia al corte del suelo.....	17
APÉNDICE 3. Mapas de resistencia a la penetración del suelo	18
APÉNDICE 4. Mapas de infiltración de agua del suelo	20
APÉNDICE 5. Mapas de infiltración de agua en el suelo.....	21
APÉNDICE 6. Informe de proyecto estudiantil.....	22
APÉNDICE 7. Galería de fotografías del proyecto	45
APÉNDICE 8. Taller PROCAGRI Municipalidad de Cartago.....	48
APÉNDICE 9. Taller de campo con productores y funcionarios de AGRINNOVACIÓN	49

2. Código y Título del proyecto

1421022 Muestro y Análisis de Suelos de Áreas Productivas (Etapa II)

3. Autores y direcciones:

Dra. Natalia Gómez Calderón (Coordinadora)

Escuela de Ingeniería Agrícola del ITCR

Correo electrónico: ngomez@itcr.ac.cr

Período de ejecución: del 01 de julio al 31 de diciembre del 2022

Dra. Karolina Villagra Mendoza

Escuela de Ingeniería Agrícola del ITCR

Correo electrónico: kvillagra@itcr.ac.cr

Período de ejecución: del 01 de julio al 31 de diciembre del 2022

4. Resumen

La Sociedad de Usuarios de Agua Sanatorio, SUA Sanatorio, es concesionaria de agua para riego y beneficiaria del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), que ha construido tomas de agua en las nacientes del Río Reventado para abastecer del recurso a diferentes grupos de productores agrícolas en la Zona Norte de Cartago. Debido a que la concesión entrega un caudal de agua restringido cada cierto tiempo, la distribución entre los productores requiere ser eficiente y la optimización del uso de los recursos es una necesidad en la zona, por lo que se midieron variables de resistencia del suelo e infiltración con el fin de capacitar a los productores en el manejo de los recursos suelo y agua, específicamente en la eficiencia de la labranza y el riego y generar mapas digitales con base en las mediciones iniciales de la etapa I de este mismo proyecto. Por medio de mediciones en el campo, visitas a los productores y talleres de campo, se hizo énfasis en la posibilidad de utilizar equipo menor para la preparación del suelo, considerar algunos puntos de compactación en tres de las fincas e indicar que es necesario el uso de emisores de bajo caudal para el riego en fincas con altos valores de infiltración, para lo que es necesario comprender las prácticas heredadas de los productores y la disponibilidad y acceso de herramientas que les permitan conocer las condiciones en el campo y tomar decisiones sobre la gestión de sus áreas productivas.

5. Abstract

The *Sociedad de Usuarios de Agua Sanatorio, SUA Sanatorio*, is an irrigation water concessionaire and beneficiary of the *Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA)* of the *Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)*, which has built water intakes at the headwaters of the Reventado River to supply the resource to different groups of agricultural producers in the Northern Zone of Cartago. Because the concession delivers a restricted flow of water, the distribution among the producers needs to be efficient and the optimization of the use of resources is a necessity in the area. Therefore, soil resistance and infiltration variables were

measured in order to train the producers in the management of soil and water resources, specifically in the efficiency of tillage and irrigation, and to generate digital maps based on the initial measurements of stage I of this same project. Through field measurements, visits to producers and field workshops, emphasis was placed on the possibility of using smaller equipment for soil preparation, considering some compaction points in three of the farms and indicating that it is necessary to use low flow emitters for irrigation on farms with high infiltration values, for which it is necessary to understand the inherited practices of producers and the availability and access to tools that allow them to know the conditions in the field and make decisions on the management of their productive areas.

6. Palabras clave y key words

Resistencia del suelo, Infiltración, Agricultura Digital, Conservación de suelos, Labranza

Soil Resistance, Infiltration, Digital Agriculture, Soil Conservation, Tillage

7. Contextualización del proyecto

La Sociedad de Usuarios de Agua Sanatorio, SUA Sanatorio, es concesionaria de agua para riego y beneficiaria del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), que ha construido tomas de agua en las nacientes del Río Reventado (Figura 1) para abastecer diferentes grupos de productores. Debido a que la concesión entrega un caudal de agua restringido cada cierto tiempo, la distribución entre los productores requiere ser eficiente y la optimización del uso de los recursos es una necesidad en la zona donde se ubican las 67 parcelas que conforman la SUA en Tierra Blanca y Potrero Cerrado de Cartago y Oreamuno. Dichas necesidades implican conocimientos de manejo de suelos porque es el recurso que retiene el agua de riego entre entregas. Además, las zonas productivas se ubican en sitios susceptibles a la erosión y a la compactación acrecentada por la labranza convencional del suelo y las condiciones de ladera, situaciones que han sido investigadas por las extensionistas ejecutoras de este proyecto y el ITCR tiene oportunidad de atender con Fondos del Impuesto al Cemento.



Figura 1. Toma de agua, conducción y reservorio de agua de SUA Sanatorio para riego. Reconocimiento del lugar guiado por el Sr. Danilo Viquez, encargado del sistema de distribución.

Los beneficiarios directos son 67 productores de Tierra Blanca y Potrero Cerrado, los cuales forman parte de la SUA con acceso al agua para riego concesionada. En la Figura 2 se muestra la distribución de algunas áreas según la textura del suelo, obtenido de la Etapa I del proyecto.

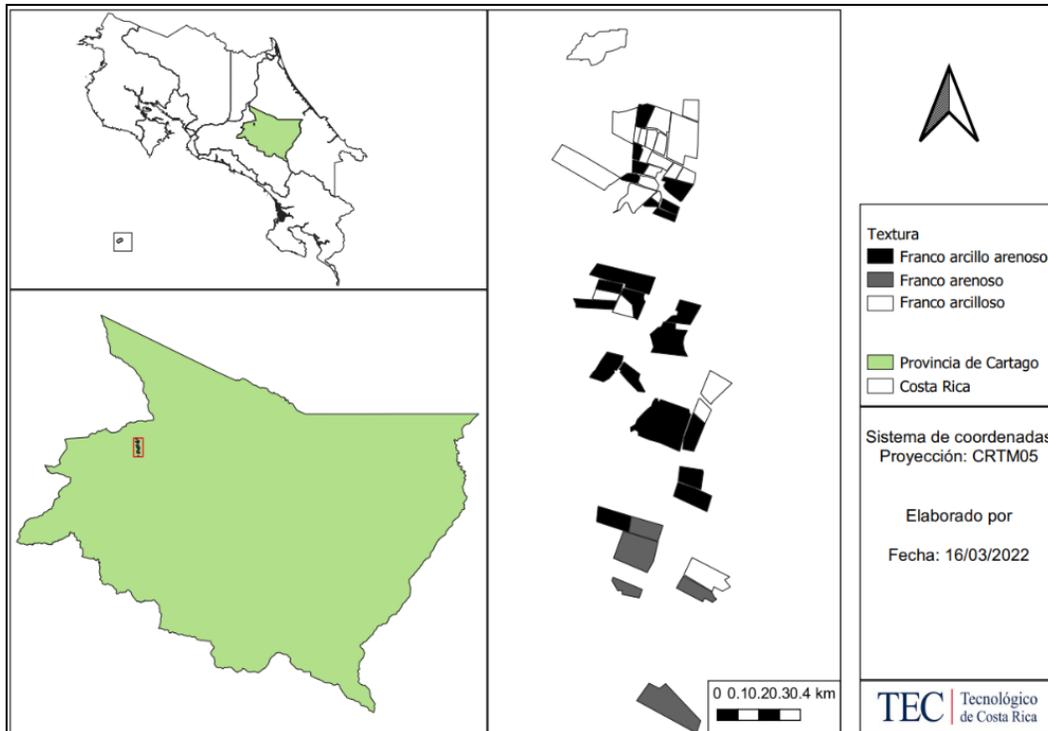


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y las parcelas de usuarios del agua muestreadas. Fuente: Villagra-Mendoza y Gómez-Calderón (2022)

El objetivo general de la propuesta fue brindar herramientas a la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) Sanatorio para el uso, manejo y conservación de suelos y agua para riego, a partir de mapas de resistencia del suelo y su capacidad de infiltración del agua. Para lo anterior, se generó información georreferenciada de la resistencia al corte y a la penetración en las áreas productivas, la capacidad de infiltración del suelo de uso hortícola de la SUA Sanatorio, y se compartió el conocimiento a las personas productoras por medio de días de campo a partir de las recomendaciones generadas.

La información generada de la Etapa I y Etapa II del proyecto, permiten una SUA mejor informada para el manejo adecuado del suelo y por tanto del agua.

8. Estrategia de abordaje

La actividad de extensión pretende dar herramientas de gestión de los recursos suelo y agua a quienes pertenezcan a la Sociedad de Usuarios de Agua - SUA Sanatorio, Cartago, con el fin de generar capacidades de buenas prácticas en el manejo, uso y conservación de los recursos productivos en mención. La propuesta da continuidad a la evaluación y generación de información obtenida de la Etapa I (ejecutada a finales del II semestre del 2021), en la que se creó un mapa digital con los puntos de muestreo y las siguientes características físicas de los suelos hortícolas analizados: textura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, agua disponible para las plantas, límites de consistencia (límite plástico inferior y superior) y pH, lo que permite diseñar riego eficiente y sistemas de manejo y conservación de suelos. Dicho mapa se complementó con la información de la capacidad de infiltración del suelo y de la resistencia

de este, con el fin de tener insumos que permitan recomendar tiempos de riego sin que haya escorrentía (pérdidas de agua no utilizada) y tipos de preparación de suelo mecanizado acorde con las características del terreno y presencia de piso de arado si fuese el caso. Por lo anterior, el mapa digital tendría información de posibles zonas productivas compactadas o de las áreas con mayores o menores infiltraciones, permitiendo una mejor gestión de los recursos del grupo beneficiado, por medio de días de campo sobre labranza de suelos. La información disponible se puso al servicio de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) Sanatorio.

El proyecto consiste en la medición en varios puntos dentro de cada unidad productiva muestreada en el Etapa I. La cantidad de puntos de medición por parcela dependió del tamaño del área productiva, en las que se medirá resistencia a la penetración y al corte, así como la infiltración. Los puntos georreferenciados continúan la alimentación del mapa de muestreos de la Etapa I. Esta información permitirá generar mapas de resistencia del suelo, para verificar requerimientos de potencia y profundidades de labranza de suelos y dar recomendaciones sobre el manejo del agua para riego y labranza de conservación.

A partir de la lista de productores y las áreas hortícolas, se realizarán las mediciones de la resistencia a la penetración con un penetrológico marca Eijkelkamp, resistencia al corte con veleta y capacidad de infiltración del suelo utilizando dispositivos minidisco, equipamiento disponible en la Escuela de Ingeniería Agrícola. Los datos obtenidos serán procesados digitalmente, utilizando software de sistemas de información geográfica de acceso libre, con el fin de obtener características de suelos georreferenciadas para una resolución de una escala 1:5000.

Los contactos de los beneficiarios se disponen desde la Etapa I, por lo que se continuó en las áreas correspondientes a la SUA Sanatorio. En cada área productiva se midió resistencia al corte y resistencia a la penetración a razón de 1, 2 o 3 puntos geolocalizados por cada área según el relieve de cada parcela y una medición de infiltración con el mismo criterio, distribuyendo las mediciones (trabajo de campo) en tres grupos de parcelas según su ubicación. Obtenidas las mediciones, se conformó una base de datos y posteriormente se construyó capas adicionales del mapa digital existente (Etapa I). A partir del análisis del mapa digital, se hicieron recomendaciones de manejo del suelo y del agua para riego por medio de dos días de campo para el grupo beneficiario (Figura 3). Para realizar las mediciones, levantamiento de la información en la base de datos, elaboración de mapas digitales y ejecución de los días de campo, se contó con apoyo de asistencias estudiantiles.

Durante las mediciones en cada finca, se tuvo contacto con los productores y se explicó en que consistía cada medición, para que se realizó y se sensibilizaba sobre los parámetros de los mediciones, lo que constituyó capacitaciones personalizadas en las que se veían las condiciones de cada área.

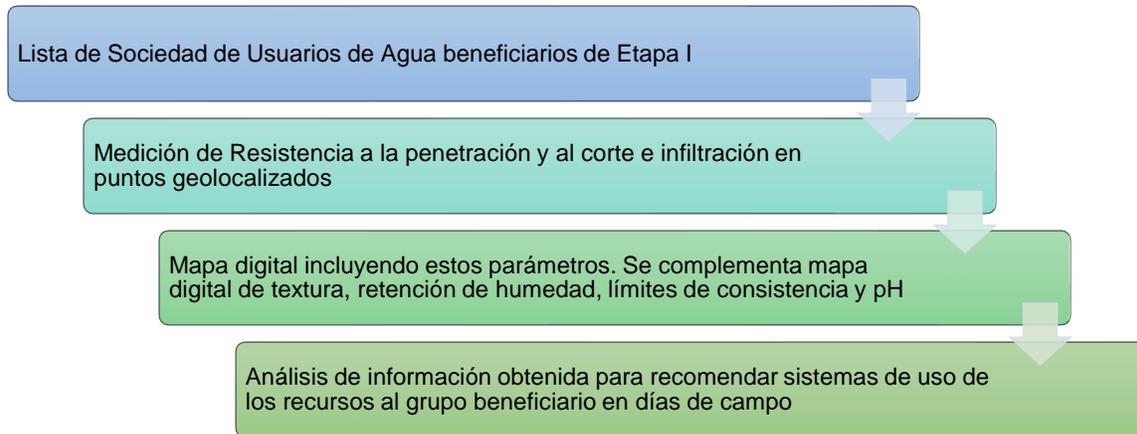


Figura 3. Esquema de trabajo propuesto.

9. Análisis de resultados

9.1 Resultados obtenidos

Los datos obtenidos se procesaron mediante el uso del software QGis y por medio de tablas de Excel utilizando los métodos mencionados en Serrano-Núñez et al. (2022). Se asignaron los datos de resistencia al corte, resistencia a la penetración, porcentaje de humedad en el suelo en el momento de la medición y la infiltración a cada finca, de manera que se pueda identificar el estado actual del suelo y así definir recomendaciones de buenas prácticas de labranza para preservar el estado del suelo y mejorar la producción, considerando los resultados de la primera etapa de este proyecto (Villagra-Mendoza & Gomez-Calderon, 2022).

Durante las cuatro giras de campo realizadas los días 8, 22, 29 y 30 de agosto del 2022, se identificaron 60 puntos para realizar mediciones de resistencia a la penetración, resistencia al corte, infiltración y mediciones de humedad en el campo. En cada punto se midió resistencia al corte y penetración hasta una profundidad de 80 cm, información de la que se obtuvo el APÉNDICE 1, en el que se muestra los puntos de profundidad críticos para cultivos de ciclo corto como la cebolla, zanahoria, fresas y papa. En total participaron 5 estudiantes asistentes en las mediciones de campo para hacer todas las mediciones en conjunto con la investigadora coordinadora de esta etapa II.

Para ninguna de las fincas, la resistencia al corte demanda una potencia mayor a los 30 kW de potencia para mecanizar el suelo a 30 cm de profundidad con una velocidad de avance de la maquinaria inferior a los 10 km h⁻¹, por lo que se puede promover entre los productores el uso de maquinaria menor para la labranza (Gómez-Calderón et al., 2018), lo que contribuye a la conservación del suelo de la zona. En el APÉNDICE 2, se muestran los puntos medidos en las diferentes fincas con la simbología respectiva.

Solamente se encontró un punto por encima de una resistencia a la penetración de 1,3 MPa (Finca 20) a 15 cm de profundidad y dos a 30 cm de profundidad (Finca 19 y Finca 4 de José Gomez). Por estas razones, en estas tres fincas se concentrará la revisión del manejo del suelo y los métodos de labranza utilizados en etapas posteriores, con el fin de acompañar el proceso y verificar si alguna situación específica de estas zonas está aumentando la resistencia a la penetración, así como revisar si hay variaciones en los rendimientos de los cultivos que pueda indicar alteraciones en el crecimiento radicular. En el APÉNDICE 3, se muestran los puntos de las diferentes fincas con la simbología respectiva.

La infiltración medida en las fincas, permite evaluar el sistema de riego que utilicen los productores y hacer recomendaciones de diseño para próximas propuestas, además de complementar el proyecto paralelo “Propuesta de modelo de automatización de los sistemas de riego mediante aplicación de técnicas de agricultura de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago”. Se detectaron seis fincas (Finca5 - Emilio Viquez, Finca10, Finca7, Finca11b, Finca27 - Cristóbal Jiménez y Finca8 - Georgina Sánchez), en donde la infiltración es significativamente superior a las otras, con un promedio de $2,31 \pm 0,35 \text{ cm h}^{-1}$. A estas fincas, se les debe recomendar emisores de bajo caudal con el fin de tener mejores eficiencias de riego. En los APÉNDICES 4 y 5, se muestra la tabla de resumen de las infiltraciones base obtenidas y las imágenes de los mapas con los puntos de muestreo en las fincas de la SUA Sanatorio.

9.2 Resumen de consideraciones en las capacitaciones a los productores.

A continuación, se enumeran tres temas principales, que deben ser profundizados en las capacitaciones de los productores asociados a la SUA Sanatorio según las mediciones realizadas:

a) Las prácticas de labranza mecanizada:

Se debe sensibilizar sobre el uso de maquinaria categoría I o hacer labranza de conservación, debido a que el tipo de suelo y su resistencia no requieren desestructura profunda si se conocen los principios de friabilidad (contenido en la Etapa I), lo que incide en los costos de las operaciones y en la conservación del suelo, debido a que está comprobado que la roturación excesiva también causa pérdidas elevadas de suelo por erosión (Gómez-Calderón et al., 2017)

b) La resistencia del suelo:

En las capacitaciones, se deben mencionar las propiedades mecánicas de los suelos, su influencia en la compactación y los efectos en la degradación del recurso y posibles repercusiones en el rendimiento de los cultivos. También debe informarse a los

productores sobre rangos teóricos de densidad aparente y resistencia a la penetración en los que mejor se desarrolla el sistema radicular.

Para las fincas que presentan condiciones de resistencias a la penetración mayores a 1,3 MPa, Finca 20 a 15 cm de profundidad y Finca 19 y Finca 4 a 30 cm de profundidad, dar seguimiento en futuras etapas del proyecto y conversar con los productores sobre el manejo que han tenido las fincas.

c) Infiltración y manejo del riego:

En las capacitaciones sobre manejo del agua para riego, instalación, mantenimiento y diseño de los sistemas, debe hablar sobre el movimiento del agua en el suelo y la importancia de conocer este parámetro en la eficiencia del riego. Para las fincas 5, 7, 10, 11b y 27, considerar y explicar el por qué son necesarios emisores de agua de bajo caudal para aumentar la eficiencia del sistema que utilicen.

También es relevante capacitar sobre la retención de humedad del suelo y su relación con la lámina de riego aplicada, la importancia del monitoreo de la humedad por medio de herramientas que le permitan a los productores tomar decisiones sobre riego en el momento de la medición. Con el fin de generar opciones accesibles, un grupo de estudiantes inició en el FAB LAB del IICA a hacer pruebas con sensores de fácil acceso, el informe se detalla en el APÉNDICE 6.

Como parte de las acciones de esta etapa del proyecto, es necesario verificar las acciones del Programa Nacional AGRINNOVACIÓN.

10. Logro del propósito y los componentes

Establezca el grado de logro de cada uno de los componentes propuestos especificando el o los indicadores que evidencian el alcance para cada componente. Utilice para ello la matriz de planificación aprobada para el proyecto incluyendo los comentarios que considere pertinentes. Se sugiere utilizar el siguiente formato.

Propósito:			
Componentes	Indicador	% de logro	Comentarios
Mediciones de la resistencia a la penetración del suelo	Mapa Digital	100	
Mediciones de la resistencia al corte del suelo	Mapa Digital	100	
Mediciones de la infiltración del suelo	Mapa Digital	100	
Días de campo	Asistencia a reuniones o atención en el campo	100	La asistencia debe mejorar en los encuentros

11. Integración de la academia:

Refiérase a las acciones realizadas durante la ejecución del proyecto orientadas a integrar las funciones sustantivas de la universidad, haciendo especial referencia a la docencia y a la participación estudiantil en sus diferentes condiciones.

Para tal efecto se recomienda utilizar las siguientes tablas:

Asistencias Estudiantiles

Nombre del estudiante	Carrera	Actividades realizadas
David Araya Quesada	Ing. Agrícola	Mediciones de campo y procesamiento de información de infiltración del suelo. Pasantía en FAB LAB del IICA para confeccionar sensor de humedad
David Araya Sanabria	Ing. Agrícola	Mediciones de campo y procesamiento de información de resistencias del suelo
Yerlin Quesada Mora	Ing. Agrícola	Mediciones de campo y procesamiento de información de resistencias e infiltración del suelo en sistemas de información geográfica
Valeria Montes Robles	Ing. Agrícola	Mediciones de campo y procesamiento de información de resistencias del suelo
Ericka Picado Mora	Ing. Agrícola	Pasantía en FAB LAB del IICA para confeccionar sensor de humedad

Nayeli Ruiz Granados	Ing. Agrícola	Pasantía en FAB LAB del IICA para confeccionar sensor de humedad
----------------------	---------------	--

Trabajos de Grado y Postgrado

Nombre de obra	Tipo de obra (TFG, prácticas de especialidad, Tesis)	Autores	Enlace al documento
No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Cursos

Curso	Carrera /Programa externo	Objetivo del curso	Actividades realizadas (giras académicas, proyectos de cursos, actividades de clase)	Evidencias (enlace al documento)
Módulo de Agricultura de Precisión	Procagri de la Municipalidad de Cartago	Analizar las variables de suelo que influyen en la agricultura de precisión para productores hortícolas	Taller de campo	Ver APÉNDICE 8
Taller de relación suelo labranza	Grupos de productores intensivos de diferentes cultivos y funcionarios del Programa AGRINNOVACIÓN	Analizar las variables de suelo que influyen en la agricultura de precisión para productores hortícolas	Taller de campo Clase Magistral	Ver APÉNDICE 9

12. Cumplimiento del plan de difusión

Nombre de obra	Tipo de obra	Estado (aceptado por publicar y publicado)	Base de datos de indexación	Nombre de Evento	Contó con Comité científico (Si ó NO)
En confección debido a que el tiempo de ejecución del proyecto fue de cuatro meses, no es suficiente para hacer publicación científica					

13. Ejecución Presupuestaria:

Partida específica	Monto solicitado	Monto ejecutado	Porcentaje ejecución	Justificación
Servicios de Ingeniería y arquitectura	691 712,01	687 760,00	99,43	
Combustibles y lubricantes	89 613,00	89 613,00	100,00	
Materiales y productos de plástico	19 340,72	19 340,72	100,00	
Herramientas e instrumentos	12 000,00	10 340,20	86,17	Descuento en factura
Útiles y materiales de oficina y cómputo	38 881,25	38 881,25	100,00	
Útiles y materiales de limpieza	6 737,34	6 737,34	100,00	
Otros útiles y materiales y suministros diversos	31 715,68	31 715,68	100,00	
Servicios internos unidad de transportes	300 000,00	240 022,00	80,01	Faltó una visita al IICA que los estudiantes realizaron por sus medios
Servicios internos unidad de publicaciones	100 000,00	100 000,00	100,00	

14. Limitaciones y problemas encontrados

La principal limitante es el tiempo de ejecución de la propuesta, debido a que los resultados dan pie a las capacitaciones y quedan por fuera del tiempo de trabajo. Además los tiempos del proyecto no coinciden con el inicio del semestre, lo que hace incurrir en recargas de horario que no están contemplados en los planes iniciales de trabajo semestral de las extensionistas.

15. Observaciones generales y recomendaciones

El trabajo de abordaje a los productores tiene componentes sociales y culturales que impiden conseguir algunos objetivos, debido a que se interfiere en su espacio de trabajo, prácticas heredadas por generaciones, educación integral, entre otros.

16. Agradecimientos

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, la Dirección de Regionalización y a la Escuela de Ingeniería Agrícola del TEC por el apoyo con los recursos necesarios, así como a la SUA Sanatorio por la disposición y apertura al trabajo. Al MAG, especialmente al Programa AGRINNOVACIÓN por permitirnos acceder a los proyectos en ejecución.

17. Referencias

Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K., & Solórzano-Quintana, M. (2018). La labranza

mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>

Gómez-Calderón, Solórzano-Quintana, & Villagra-Mendoza. (2017). Cuantificación de la Erosión Hídrica en Función de Diferentes Técnicas de Mecanización para Minimizar la Contaminación del Agua por Sedimentos en la Parte Alta de la Cuenca del Río Reventazón. In *RepositorioTEC*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9164>

Serrano-Núñez, V., Guillén-Rivera, S., Watson-Hernández, F., Solórzano-Quintana, M., & Gomez-Calderon, N. (2022). AGRINNOVACIÓN 4.0: Herramienta metodológica de clasificación para determinación de áreas de producción de cultivos de ciclo corto. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i5.6059>

Villagra-Mendoza, K., & Gomez-Calderon, N. (2022). *Informe de proyecto de Extensión-Fondos Impuesto al Cemento. Muestreo y Análisis de Suelos de Áreas Productivas (Etapa I)*.

18. Apéndices

APÉNDICE 1. Mediciones de resistencias del suelo realizadas en cada punto de muestreo de la zona de estudio

Propietario	Textura	RC15 (MPa)	RC30 (MPa)	RP15 (MPa)	RP30 (MPa)	%CH _v
Finca1 - Asenjo	Franco arenoso	0,048	0,026	0,515	1,011	29,2
Finca1 - Asenjo	Franco arenoso	0,016	0,018	0,064	0,513	31,6
Finca1 - Asenjo	Franco arenoso	0,014	0,018	0,066	0,742	27,8
Finca1 - Asenjo	Franco arenoso	0,010	0,031	0,286	0,543	31,5
Finca1 - Asenjo	Franco arenoso	0,010	0,012	0,063	0,318	29,8
Finca10	Franco arcillo arenoso	0,020	0,036			10,9
Finca11a	Franco arcillo arenoso	0,022	0,018	0,132	0,005	6,4
Finca11a	Franco arcillo arenoso			0,095	0,780	
Finca11a	Franco arcillo arenoso			0,005	0,005	
Finca11b	Franco arcillo arenoso	0,038	0,114	0,365	1,200	7,8
Finca11b	Franco arcillo arenoso			0,098	0,250	
Finca11b	Franco arcillo arenoso			0,270	0,820	
Finca12 - Pablo Guzmán	Franco arcillo arenoso	0,038	0,114	0,264	0,758	7,8
Finca14 - Bernardo Molina	Franco arenoso	0,008	0,038	0,247	0,306	30,1
Finca14 - Bernardo Molina	Franco arenoso	0,018	0,030	0,261	0,517	23,3
Finca15 - ANDROGIL	Franco arenoso	0,014	0,034	0,215	0,370	27,2
Finca15 - ANDROGIL	Franco arcillo arenoso	0,012	0,046	0,658	0,833	27,3
Finca16 - Danilo-Carlos Jiménez	Franco arcillo arenoso	0,034	0,060	0,682	0,803	31,3
Finca16 - Danilo-Carlos Jiménez	Franco arcillo arenoso	0,058	0,042	0,400	0,650	27,2
Finca17 - Manuel Viquez	Franco arcillo arenoso	0,020	0,030	0,458	0,309	38,3
Finca18 - Miguel Guillen	Franco arcillo arenoso	0,016	0,034	0,203	0,391	39,9
Finca18 - Miguel Guillen	Franco arcillo arenoso	0,024	0,026	0,292	0,621	40
Finca18 - Miguel Guillen	Franco arcillo arenoso	0,014	0,032	0,258	0,748	25,8
Finca19 - Olga Guillen	Franco arenoso	0,020	0,048	0,270	1,364	36,7
Finca2 - Alexander (Fresa)	Franco arenoso	0,010	0,048	0,310	0,950	21,3
Finca2 - Alexander (Fresa)	Franco arcillo arenoso	0,024	0,042	0,479	0,077	27,4
Finca2 - Alexander (Fresa)	Franco arcillo arenoso	0,018	0,035	0,476	0,003	22,7
Finca2 - Alexander (Fresa)	Franco arenoso	0,014	0,014	0,359	0,003	16,2
Finca20	Franco arcillo arenoso	0,040	0,056	1,361	0,003	42,7
Finca20	Franco arenoso	0,024	0,042	0,373	0,364	39,1

Finca21 - Anderson Araya-Fernando-Luis-Asdrúbal Rivera	Franco arcillo arenoso	0,018	0,050	0,294	0,382	36,7
Finca21 - Anderson Araya-Fernando-Luis-Asdrúbal Rivera	Franco arcillo arenoso	0,012	0,062	0,327	0,327	
Finca21 - Anderson Araya-Fernando-Luis-Asdrúbal Rivera	Franco arcillo arenoso	0,026	0,042	0,433	0,733	37,9
Finca22 - Mario Acuña	Franco arcillo arenoso	0,018	0,034	0,371	0,778	
Finca23 - Jonathan Álvarez	Franco arcillo arenoso	0,010	0,032	0,339	0,788	
Finca23 - Jonathan Álvarez	Franco arcillo arenoso	0,010	0,024	0,355	0,717	
Finca24 - Diego-Simón Asenjo	Franco arcillo arenoso	0,014	0,028	0,246	0,642	
Finca24 - Diego-Simón Asenjo	Franco arcilloso	0,026	0,039	0,115	0,991	
Finca24 - Diego-Simón Asenjo	Franco arcilloso	0,010	0,022	0,324	0,711	
Finca25 - Eduardo Gómez	Franco arcilloso	0,006	0,012	0,264	0,533	
Finca26 - Víctor Asenjo	Franco arenoso	0,010	0,050	0,124	0,376	
Finca27 - Cristóbal Jiménez	Franco arcilloso	0,008	0,012	0,236	0,225	
Finca27 - Cristóbal Jiménez	Franco arcilloso	0,030	0,032	0,206	0,715	
Finca28 - Ana Aguilar	Franco arcilloso	0,006	0,008	0,223	0,416	
Finca3 - Ronald Córdoba	Franco arenoso	0,012	0,022	0,464	1,094	21,8
Finca3 - Ronald Córdoba	Franco arcillo arenoso	0,006	0,030	0,415	0,332	17,8
Finca3 - Ronald Córdoba	Franco arenoso	0,016	0,028	0,279	0,003	17,8
Finca3 - Ronald Córdoba	Franco arenoso	0,016	0,030	0,603	0,772	22
Finca3 - Ronald Córdoba	Franco arenoso	0,004	0,028	0,479	0,621	19,6
Finca4 - José Gómez	Franco arcillo arenoso	0,010	0,056	0,570	0,003	24,3
Finca4 - José Gómez	Franco arcillo arenoso	0,004	0,028	0,496	1,361	20,7
Finca5 - Danilo Viquez	Franco arenoso	0,010	0,016	0,636	0,733	18,2
Finca5 - Emilio Viquez	Franco arenoso	0,024	0,030	0,249	0,003	17,8
Finca5 - Miriam Rivera	Franco arenoso	0,012	0,050	1,040	0,413	22,7
Finca5 - Miriam Rivera	Franco arenoso	0,040	0,100	0,646	0,003	17,4
Finca5 - Miriam Rivera	Franco arenoso	0,050	0,074	0,494	0,575	24,3
Finca6	Franco arcillo arenoso	0,014	0,044	0,864	0,854	1,7
Finca6	Franco arcillo arenoso	0,034	0,040	0,249	0,003	14,3
Finca6	Franco arcillo arenoso	0,022	0,040	0,558	0,558	17,7
Finca7	Franco arenoso	0,012	0,020	0,689	0,982	11,2
Finca7	Franco arenoso	0,008	0,012	0,526	0,570	14,3
Finca7	Franco arenoso	0,014	0,024	0,565	0,752	10,8
Finca8 - Georgina Sánchez	Franco arcillo arenoso	0,012	0,040	0,267	0,722	10,6
Finca8 - Georgina Sánchez	Franco arcillo arenoso	0,042	0,110	0,003	0,003	21
Finca8 - Georgina Sánchez	Franco arenoso	0,036	0,070	0,404	0,989	14,1
Finca8 - Georgina Sánchez	Franco arenoso	0,016	0,036	0,870	0,615	10,4
Finca9 - Carlos Angulo	Franco arcillo arenoso	0,044	0,040	0,573	0,951	17,5

APÉNDICE 2. Mapas de resistencia al corte del suelo

Se muestran los mapas digitales con los linderos de las fincas, las texturas del suelo y los puntos de medición de la resistencia al corte a 15 y 30 cm de profundidad.

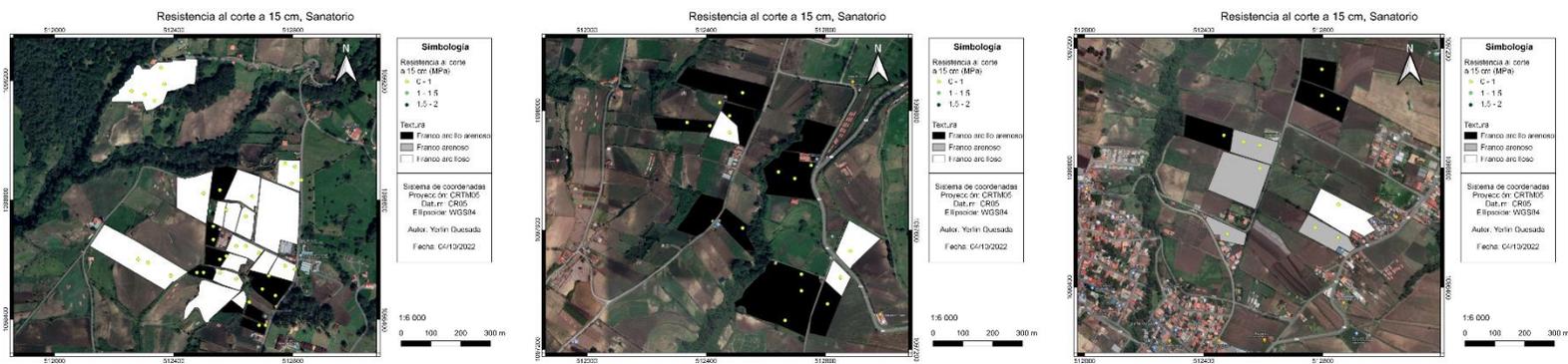


Figura A2.1. Mapas de ubicación y rangos de resistencia al corte a 15 cm de profundidad en las fincas de la SUA Sanatorio.

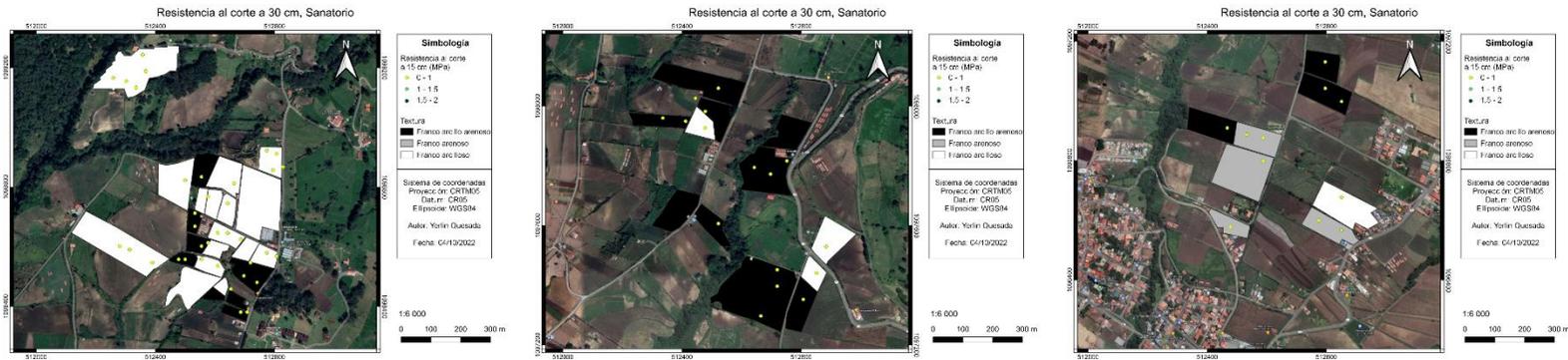


Figura A2.2. Mapas de ubicación y rangos de resistencia al corte a 30 cm de profundidad en las fincas de la SUA Sanatorio.

APÉNDICE 3. Mapas de resistencia a la penetración del suelo

Se muestran los mapas digitales con los linderos de las fincas, las texturas del suelo y los puntos de medición de la resistencia a la penetración a 15 y 30 cm de profundidad.

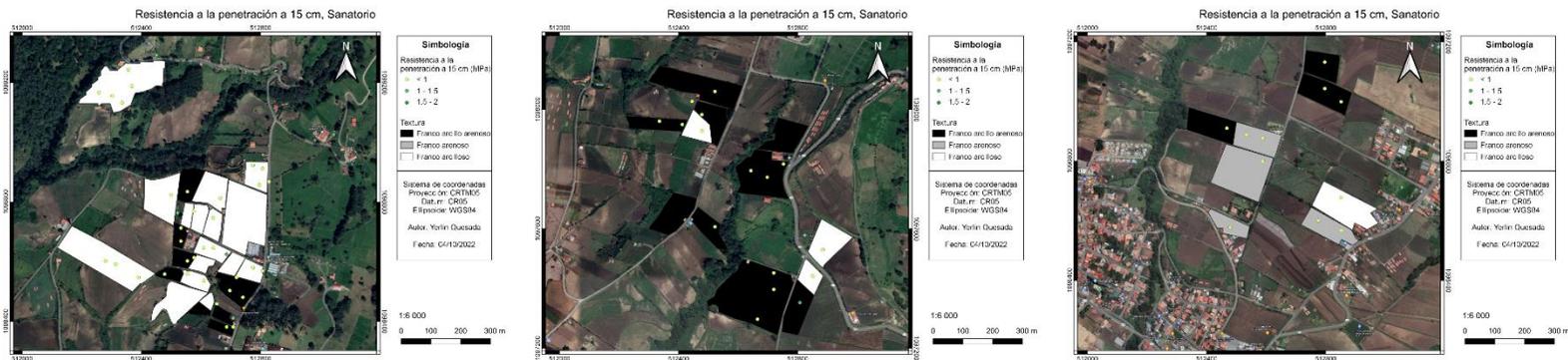


Figura A3.1. Mapas de ubicación y rangos de resistencia a la penetración a 15 cm de profundidad en las fincas de la SUA Sanatorio.

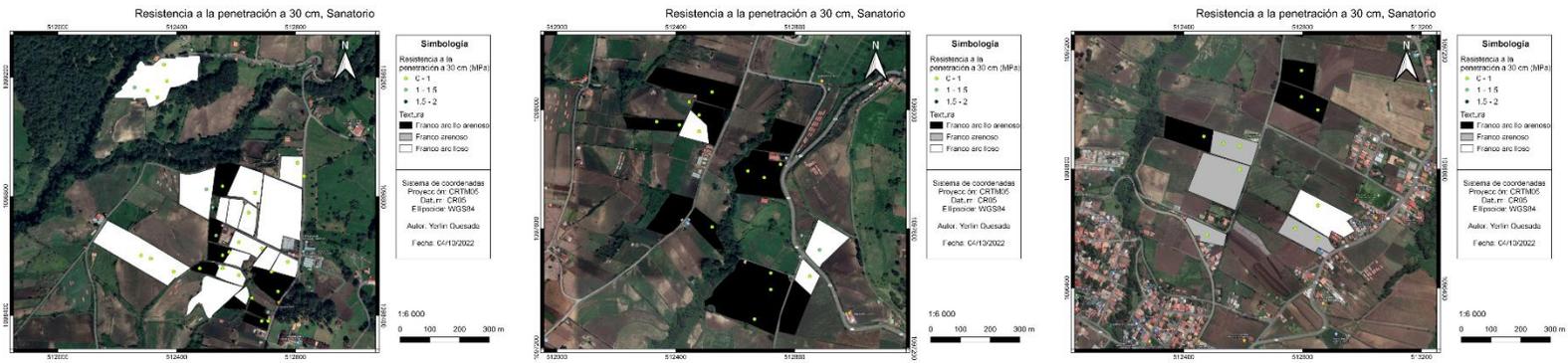


Figura A3.2. Mapas de ubicación y rangos de resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad en las fincas de la SUA Sanatorio.

APÉNDICE 4. Mapas de infiltración de agua del suelo

En el cuadro AP4.1, se detalla la infiltración base medida en los puntos de muestreo de la zona en estudio.

Parcela - propietario	Infiltración cm*h-1	Textura
Finca19 - Olga Guillen	0,1258	Franco arenoso
Finca2 - Alexander (Fresa)	0,25	Franco arcillo arenoso
Finca17 - Manuel Viquez	0,2515	Franco arcillo arenoso
Finca22 - Mario Acuña	0,2515	Franco arcillo arenoso
Finca23 - Jonathan Álvarez	0,2515	Franco arcillo arenoso
Finca11a	0,3773	Franco arcillo arenoso
Finca15 - ANDROGIL	0,3773	Franco arcillo arenoso
Finca1 - Asenjo	0,38	Franco arenoso
Finca1 - Asenjo	0,38	Franco arenoso
Finca2 - Alexander (Fresa)	0,38	Franco arenoso
Finca3 - Ronald Córdoba	0,38	Franco arenoso
Finca16 - Danilo-Carlos Jiménez	0,4401	Franco arcillo arenoso
Finca20	0,4401	Franco arenoso
Finca12 - Pablo Guzmán	0,503	Franco arcillo arenoso
Finca18 - Miguel Guillen	0,503	Franco arcillo arenoso
Finca5 - Danilo Viquez	0,57	Franco arenoso
Finca21 - Anderson Araya-Fernando-Luis-Asdrúbal Rivera	0,6288	Franco arcillo arenoso
Finca24 - Diego-Simón Asenjo	0,6288	Franco arcilloso
Finca28 - Ana Aguilar	0,6288	Franco arcilloso
Finca9 - Carlos Angulo	0,6288	Franco arcillo arenoso
Finca3 - Ronald Córdoba	0,69	Franco arenoso
Finca14 - Bernardo Molina	0,7545	Franco arenoso
Finca1 - Asenjo	0,88	Franco arenoso
Finca6	0,8803	Franco arcillo arenoso
Finca8 - Georgina Sánchez	0,8803	Franco arenoso
Finca26 - Víctor Asenjo	1,0689	Franco arenoso
Finca4 - José Gómez	1,07	Franco arcillo arenoso
Finca5 - Miriam Rivera	1,07	Franco arenoso
Finca25 - Eduardo Gómez	1,2575	Franco arcilloso
Finca6	1,2575	Franco arcillo arenoso
Finca3 - Ronald Córdoba	1,32	Franco arenoso
Finca4 - José Gómez	1,45	Franco arcillo arenoso
Finca5 - Emilio Viquez	1,82	Franco arenoso
Finca10	2,0749	Franco arcillo arenoso
Finca7	2,2007	Franco arenoso
Finca11b	2,4522	Franco arcillo arenoso
Finca27 - Cristóbal Jiménez	2,4522	Franco arcilloso
Finca8 - Georgina Sánchez	2,8294	Franco arcillo arenoso

APÉNDICE 5. Mapas de infiltración de agua en el suelo

Se muestran los mapas digitales con los linderos de las fincas, las texturas del suelo y los puntos de medición de la infiltración básico del suelo.

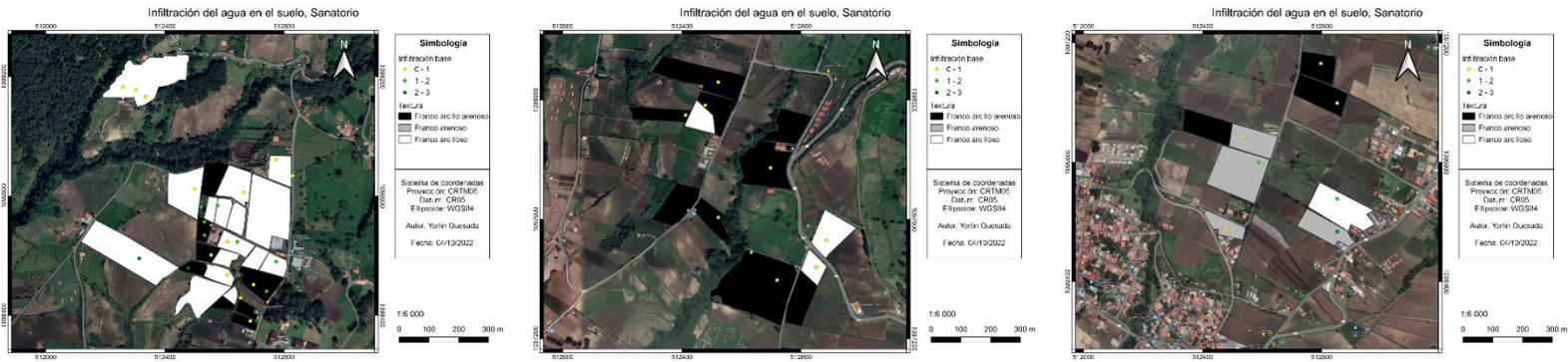


Figura AP5.1. Mapas de ubicación y rangos de infiltración del agua en las fincas de la SUA Sanatorio

APÉNDICE 6. Informe de proyecto estudiantil

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



CONSTRUCCIÓN DE SENSOR DE HUMEDAD “EDANA” PARA LA
UTILIZACIÓN EN LAS LABORES AGRÍCOLAS DE LOS USUARIOS DE
LA SUA

DAVID ARAYA QUESADA

ERICKA PICADO MORA

NAYELI RUÍZ GRANADOS

CARTAGO, 2022

Resumen

Los sensores de humedad son fundamentales para determinar de manera rápida y confiable la humedad gravimétrica de los suelos, lo cual es de suma importancia para realizar correctivos procesos en los cultivos y con ello mejorar los rendimientos y la producción. Es por ello que en este informe, se ejemplifica la creación de un sensor de humedad como producto de bajo costo que permita a las personas afines al área agrícola facilitar y mejorar sus labores. Este se realizó mediante el uso de diversas herramientas digitales y programas inteligentes como Arduino, así mismo se sometió a un proceso de calibración para la obtención de una determinada ecuación de calibración y su coeficiente de determinación de esto se obtiene que dicho coeficiente es de 0,6251. Finalmente, se logra concluir que el sensor EDANA es un producto con una eficiencia promedio y que a su vez se puede realizar mediante costos muy bajos.

Introducción

La medición del porcentaje de humedad gravimétrica de los suelos en un aspecto esencial para el buen mantenimiento y productividad de los cultivos, y es que, al conocer estas variables se pueden determinar con criterio necesarios los tiempos que riegos en cada una de las parcelas en estudio, y con ello, no solo beneficiar a los cultivos, sino también, ahorrar el recurso hídrico que se utilice para estas funciones.

La medición de humedad en los suelos se puede desarrollar a parte de la implementación de diferentes métodos, mismos que se dividen en métodos directos e indirectos, cada uno de los procedimientos tiene características propias, pero siempre, se logra llegar al mismo objetivo, la determinación de la humedad en el suelo, sin embargo, estos procedimientos suelen ser largos y laboriosos y requieren del material necesarios para realizar la operación de una manera eficaz y eficiente, por lo que, se deben buscar alternativas que logren generar soluciones necesarias en el campo, considerando que, se pueden presentar diferentes condiciones adversas, que implican un mal desarrollo e implementación del riego (Sánchez et al, 2019).

El uso de sensores de humedad se ha convertido en un aspecto fundamental para la determinación de la humedad gravimétrica de los suelos, dado que, a partir del uso de un

implemento sencillo es posible, inclusive, conocer en tiempo real cuales son las necesidades hídricas en el terreno, y a partir de esto tomar la decisión de regar o no regar el cultivo. Este tipo de sensores, pueden presentar en diferentes formas, algunos de estos son más robustos, de gran tamaño, con complicaciones para ser movilizadas en el campo, e inclusive, tienen altas consecuencias si son utilizados bajo condiciones atmosféricas adversas.

Antes el estudio y análisis de las situaciones que se presentan en la Zona Norte de Cartago, específicamente con los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua del Sanatorio Durán, se desarrolló un sensor de humedad gravimétrica, el cuál utiliza diferentes componente electrónicos, y permite, de forma sencilla, a partir de capacitancia conocer el porcentaje de humedad de los suelos, este sensor, se pensó con el fin de generar un producto resistente al agua, y que permita, mediante el almacenamiento de datos el análisis de la información, de forma tal que, sea posible crear planes de riego de forma eficiente, beneficiando a los productores de la zona.

En el presente informe se presentarán, cada uno de los pasos que se llevaron a cabo para la construcción del sensor, y como es que se realizó el proceso de calibración del mismo.

Metodología

El presente informe se realizó en base a la construcción del sensor de humedad EDANA, como parte del proyecto de Extensión realizado en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, en la Sociedad de Usuarios de Agua del Sanatorio Durán, con la utilización del fondo proveniente del Impuesto al Cemento, esto a partir de una proceso teórico-práctico, donde se aplicaron los diferentes conocimiento adquiridos en el transcurso de la carrera y que llevaron a concluir con un producto final de calidad y acorde a las necesidades a partir de las cuáles se elaboraron.

Para la construcción del sensor se realizaron diversas visitas al Instituto Interamericano de Cooperación en la Agricultura (IICA) ubicado en el sector de Coronado, San José; donde, con el apoyo del personal del FabLab se realizó el diseño del prototipo del sensor y se identificaron las condiciones que presentan los productos de la Zona Norte de Cartago, con el fin de contribuir con el análisis de la humedad gravimétrica de los suelos. En primer lugar, fue importante identificar todas las condiciones que se presentan en la zona en

estudio, y a partir de esto, se inició una investigación exhaustiva con relación a como es el proceso de elaboración de un sensor de humedad, y cuáles son los principales aspectos que se toman en cuenta para la elaboración del mismo.

Del mismo modo, en cada una de las visitas realizadas se utilizó el transporte brindado por el Tecnológico de Costa Rica, en donde, en total se realizaron 5 visitas, en cada una de ellas se procedió a realizar y a analizar el diseño construido, así mismo, se realizaron los cambios que se consideraron pertinentes para finalmente lograr concretar el producto final.

Procedimiento

Para la elaboración del sensor de humedad EDANA, se realizaron una serie de pasos, que permitieron la creación de este de manera efectiva y concisa, generando así un producto final de calidad y acorde a las necesidades que se identificaron para los productores de la Sociedad de Usuarios del Sanatorio (SUA), dicho pasos y la ejecución de los mismo se detallarán a continuación.

En primer lugar, se realizó la identificación del problema, esto a partir de las giras realizadas a las distintas parcelas en la zona norte de Cartago, específicamente para aquellas parcelas pertenecientes a la SUA, y es que, esta zona, se caracteriza por aplicar una agricultura tradicionalista, en donde hay prácticamente nula presencia de mecanismos que permitan el monitoreo de los suelos para términos de riego en los cultivos. Es importante mencionar que, a raíz de esto, se pretendió diseñar un sensor de humedad, que permita a los productores monitorear sus suelos, e identificar de una forma sencilla el momento concreto en el cual se tiene que realizar el riego, a partir del seguimiento de la humedad de los suelos.

Una vez identificado el problema fue relevante analizar los criterios de diseños y requerimiento que se deben tener en cuenta para la creación del sensor de humedad, como, por ejemplo, la forma de guardar la información, la autonomía del producto, la duración aproximada de la medición y los costos que todo el proceso de ensamblado llevaría. Ante esto, se evidenció, que es esencial crear un producto que pueda realizar mediciones de manera automática, sin necesidad de intervención directa, lo que facilita aún más el trabajo de análisis de datos, de igual manera, el producto tiene que ser resistente a condiciones ambientales

adversas, como lluvias y fuertes vientos, asimismo el generar un producto a bajo costo en comparación con otros implementos fue uno de los principales objetivos del trabajo, y que permitieron crear un sensor acorde a las necesidades.

Seguidamente, luego de identificar las condiciones presentes, y seleccionar cada uno de los componentes que iban a ser necesarios para la construcción del sensor, se procedió a armar el prototipo, el cual, está constituido por diferentes elementos electrónicos, soldados a una placa de Arduino, este Arduino, presenta una programación, que puede ser modificada en cuanto a periodos de tiempo de medida y análisis de datos, de igual manera, sobre la placa se soldaron diferentes componentes, cuyas características permiten el buen funcionamiento del sensor, de forma tal que, al poner el sensor de capacitancia en algunos superficie este empezará a realizar mediciones, que posteriormente podrán ser extraídas mediante una memoria micro SD, que se encuentra incluía dentro del sensor.

Cabe destacar que, al realizar el armazón del prototipo, se procuró que todos los componentes estuvieran debidamente soldados, para procurar el correcto mantenimiento de cada uno de ellos dentro del campo de trabajo, dicha soldadura se realizó con un caufín y estaño, en un proceso minucioso, donde se trabajó con cableado pequeño y de alta calidad, que permitiera el paso correcto de la corriente, por lo que, cada vez que un cable se conectaba se realizaba una verificación minuciosa para procurar la no existencia de circuitos eléctricos.

Una vez se terminó con la placa final, se realizó la programación para el sensor dentro de la aplicación Arduino IDE, esta aplicación es característica utilizarla en los procesos de programación de arduinos en diferentes proyectos electrónicos, la programación en este caso se basa en un ciclo, el cual, una vez entra la corriente eléctrica mediante las baterías al sistema, este empieza a iniciar la tarjeta micro SD, a partir de que la tarjeta mencionada inicie, se empiezan a guardar datos con la fecha y hora, esta última con la hora, minuto y segundo, este conteo se realiza a partir de la conexión del Arduino con el reloj, permitiendo generar resultados justos y precisos en cuanto al momento en el cual se tomaron los datos. Mientras que, de igual manera, la fecha presenta el día, el mes y el año. Además, se establece un periodo de tiempo en el cual se tomarán los datos medidos, este periodo de tiempo podría variarse de acuerdo con las necesidades y datos analizados con anterioridad. La programación generada se encuentra en la sección de Anexos.

Con el prototipo ya diseñado y construido se procedió a realizar periodos de prueba, en los cuáles, se realizaron mediciones dentro del invernadero de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, esto para comprobar la duración de la batería del sensor, así también, para conocer el proceso de medición que realiza el prototipo y condiciones que presenta el sensor al momento del desarrollo del trabajo, una vez realizada la primer prueba se detectaron ciertos errores, meramente de utilización del sensor, por lo que, luego de una corroboración se volvieron a realizar medidas y se determinaron, todas las características que presenta este prototipo, que cuenta, además, con una caja anti agua, que también fue probada durante los distintos periodos.

Ahora bien, como base de los mejoramientos, y prácticas realizadas fue esencial conocer nuevas estrategias para la construcción del sensor, dentro de las que se encontró la posibilidad de que la placa con los elementos fuera impresa, y así se redujeran los tiempos en mano de obra que generaría soldar cada uno de los componentes directamente con la soldadura, por lo que, se creó la modificación de imprimir la placa electrónica, que fue diseñada mediante distintos softwares de modelación eléctrica, y se buscaron proveedores que pudieran realizarlas, esto constituyó parte esencial del proceso, dado que, a partir de las modificaciones realizadas se genera un producto de alta calidad, con un costo accesible, y que presenta condiciones óptimas para el trabajo en campo.

Calibración del sensor

El proceso de calibración se realizó a partir de la comparación de datos tomados a partir del sensor y a partir de muestras de suelos, que fueron tomadas en diferentes tiempos para con ello lograr obtener los datos requeridos. En primera instancia se instaló el sensor de humedad y un terreno cercano a la Escuela de Ingeniería Agrícola, para que se pudieran tomar los datos de interés.

Una vez instalado el sensor, se procede a realizar el proceso de calibración, con el objetivo de poder obtener una ecuación más real y segura con respecto a los datos obtenidos. Para ello, se realizaron diversas pruebas en campo con el sensor, y a su vez se sacaron muestras de suelo que calzaran con el tiempo de medida del sensor, de ello se calcularon tomaron un total de 19 muestras de suelo y datos medidos por el sensor. A las muestras se

les realizó todo el proceso de estudio necesario en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Ing. Agrícola para obtener el %HG y posterior a ello, tabular todos los de las muestras y el sensor de acuerdo con la relación del tiempo y día en que se tomaron.

Cabe recalcar que, al ser muestras tomadas en cilindros fue necesario pesar cada uno de los cilindros y las bandejas utilizadas para realizar la diferencia respectiva y obtener el peso del suelo tanto seco como húmedo de una manera concreta.

Una vez con los datos tabulados se procedió a realizar el cálculo de la humedad gravimétrica y a realizar la comparación con los datos obtenidos mediante el sensor de humedad, a partir de este análisis de datos, fue posible crear una relación entre ambos datos, y a partir de esto obtener la ecuación de calibración apropiada para el sensor de humedad, esta ecuación, será la utilizadas en el sensor, y permitirá obtener los datos respectivos, esto se realizó mediante el siguiente procedimiento.

Lo primero que se realizó fue acomodar los datos de menor a mayor, luego, se realizó el cálculo del promedio y la desviación estándar de todos los datos de humedad. Trabajando a partir de esto, se procedió a eliminar los datos extremos. Seguidamente, se identificaron valores de capacitancia que se repetían, por ello se calculó el promedio de la humedad correspondiente a esos valores, para que pudiera realizarse una correcta tabulación y a partir de ello una gráfica determinada, a partir de este proceso se tabularon únicamente 9 datos de muestras y 9 datos de lecturas del sensor.

Una vez realizado esto, se realizó la gráfica correspondiente y en esta se estableció una línea de mejor ajuste, posteriormente, se estableció la ecuación de calibración y el coeficiente de determinación, para con ello, finalizar la búsqueda de la ecuación correspondiente.

Revisión de Literatura

El contenido de humedad se define como la relación existente entre el peso de agua contenida en la muestra en estado natural y el peso de la muestra una vez secada la misma en el horno, asimismo, el contenido de humedad es sinónimo de humedad gravimétrica, este

valor, suele darse en un valor porcentual, aspecto el cuál permite analizar de mejor manera los datos suministrados, y crear una relación más concisa con los demás parámetros que se deban estudiar (Martínez Inca, 2021).

La determinación del contenido de humedad es un proceso lento, pero no complejo, esto debido a que, para poder obtener los datos requeridos es necesario realizar diferentes pruebas que por sí solas requieren de un tiempo de análisis exhaustivo y largo, y por ende, el análisis de los datos se da en un periodo de tiempo realmente considerable.

La medición de humedad gravimétrica se puede desarrollar de diferentes maneras cada una de ellas se caracteriza por ser empírica, esto quiere decir que están basadas en la experiencia de quién ejecuta la prueba, tomando en consideración que, para cada una de las pruebas que se realice se debe tener una cantidad considerable de probabilidades, para con ello poder analizar las situaciones que se presenten dentro de la zona en estudio, y si es el caso, poder eliminar aquellos datos que no sean representativos.

Cada una de las pruebas que son posibles realizar emplean variables como lo son la sensación de humedad al tacto, o la diferencia de peso entre muestras, esta última la más utilizada en aquellos estudios que requieran una gran representatividad de los datos, y que permiten mostrar de mejor manera los contenidos de humedad de un suelo a partir de muestras. A partir de los métodos que se apliquen es posible establecer diferentes parámetros en un tiempo determinado y con ello poder analizar las condiciones del suelo en un tiempo en específico.

Existen métodos tanto directos como indirectos, entre los métodos directos se encuentra el método gravimétrico, este consiste en extraer una muestra indisturbada del suelo en la zona en estudio, y medir su peso inmediatamente después de que se extrae el cilindro del suelo, una vez tomada la medida se procede a realizar su secado por medio de un horno a 105°C por 24 horas, para luego de esas 24 horas, medir nuevamente el peso de la muestra, que para ese momento ya no tendrá contenido de humedad dentro de ella. Según la literatura, este proceso es el más preciso para la obtención del contenido de humedad en el suelo (Villacrés Chérrez, 2022).

Para la determinación de la humedad gravimétrica, es necesario emplear una ecuación matemática, la cual se identifica como ecuación 1.

$$\%HG = \frac{Psh - Pss}{Psh} * 100 \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

$\%HG =$ Porcentaje de humedad gravimétrica

$Psh =$ Peso suelo húmedo (g)

$Pss =$ Peso suelo seco (g)

Es a partir de la aplicación de la ecuación 1 que se facilita el proceso para la determinación de la humedad gravimétrica, sin embargo, es importante mencionar que, para poder obtener el peso del suelos húmedo y seco, se deben de restar el peso del cilindro y la bandeja que se usaron para evitar la pérdida de suelo, y es a partir de esta diferencia que se obtiene el valor real del peso del suelo.

Volviendo al análisis de los métodos, se encuentran los indirectos, estos, se caracterizan por tomar mediciones indirectas de humedad, lo que quiere decir que, para poder obtener el porcentaje de humedad gravimétrica necesaria se debe de realizar un proceso de calibración, y a partir de este se determina una ecuación de mejor ajuste, el cuál es necesario para obtener los parámetros necesarios y con ello determinar la humedad.

Entre estos métodos se encuentran; tensión del suelo, atenuación de rayos gamma y reflector de dominio temporal, este último es una técnica electromagnética, que permite determinar el contenido de humedad de los suelos utilizando equipos TDR, que requieren de una función relacionada con la constante dieléctrica aparente (Martínez Inca, 2021).

Para poder determinar el contenido de humedad en el suelo, es necesario introducir las varillas sensoriales en el perfil del suelo, en donde, el sensor, registrará el día, hora, y medida tomada en un tiempo específico, y cumpliendo con un rango de determinación según corresponda. Es importante mencionar que, los métodos más utilizados dentro de la

reflectometría en el dominio temporal se encuentran los sensores de resistencia eléctrica y los sensores capacitivos.

Sensor Capacitivo

Los sensores capacitivos se basan en un funcionamiento sobre un circuito eléctrico que permite medir los cambios en la capacitancia del medio debido a los cambios en la permitividad relativa que se puedan generar, y es que, este tipo de sensores utiliza la permitividad para lograr estimar el contenido de agua en el suelo, esto, a partir del alto valor de la magnitud en el agua, que es mucho mayor a la de los sólidos presentes en el suelo (Aranda et al, 2022).

Es importante recalcar que, este tipo de sensores, ofrecen diferentes ventajas, entre las que se encuentra el hecho del bajo costo de los mismo, lo que permite generar gran cantidad de unidades, en el caso que se requiera, y, además, facilita lograr un ahorro económico, comparado con otros sensores que se pueden utilizar para la misma función.

Ahora bien, para lograr la utilización de un sensor de capacitancia, este requiere de una programación detallada, para que, los datos se puedan determinar en un tiempo específico y que, además, puedan ser extraídos del sistema, de forma tal que se puedan comprender con detenimiento, y el análisis se pueda realizar de manera correcta.

Arduino

El Arduino, es una plataforma electrónica de código abierto que se basa en un hardware y software de fácil utilizad, sobre el cuál es posible programar diferentes aparatos electrónicos, para que su funcionamiento se de bajo una línea de interés, esto en cuanto a la toma de datos, y cantidad de los mismo según los tiempos que se requieran.

Los Arduinos, son placas electrónicas, sobre las cuáles se pueden leer datos y convertirlos en datos de salida, que, además, pueden ser extraídos mediante una tarjeta microSD, y ser descargados en un formato consistente dentro de las computadoras del usuario, para, a partir de allí poder realizar el post procesamiento de datos. El Arduino, además, se caracteriza por tener costos accesibles, que permiten crear sistemas compatibles

con cualquier funcionalidad, como sensores de humedad, y sistemas de riego programados (Sanchez et al, 2019).

El programa Arduino IDE, es uno de los softwares más utilizados para crear los códigos de programación correspondiente, y que, a partir de allí los sensores de capacitancia logren tomar las mediciones en los tiempos y forma requeridos, para, a partir de esto lograr generar un producto de calidad, y totalmente programado para su correcta utilización.

Tanto el hardware y el software mencionados con de bajo costo, y de código libre, según corresponda, lo que permite realizar mediciones sin limitantes en relación al almacenamiento que se requiere, sin embargo, el ensamblado sobre los arduinos puede, en diferentes ocasiones complicarse debido a la cantidad de cables y tamaño de los aparatos electrónicos, sin embargo, hoy en día existente arduinos ya diseñados propiamente para lo que se requiera, lo que agiliza los procesos de ensamble.

Resultados

Una vez realizado el procedimiento detallado anteriormente se obtuvieron una serie de resultados, mismos que se detallarán a continuación.

En primera instancia, fue importante la determinación de las condiciones en las cuáles se realizó el ensamblado del primer prototipo del sensor de humedad, este, se diseñó a partir de una placa de Arduino, y se soldaron cada uno de los componentes de forma manual, sin embargo, para ser de utilidad en fincas bajo una diversificación de condiciones climáticas, fue posible realizar un rediseño de la placa, esta fue diseñada a partir de una aplicación web, especializada en electricidad, esta placa se caracteriza por tener un diseño más sencillo y acorde a las necesidades, generando así, un sensor que permita ser utilizado a partir de las diferentes condiciones que se presenten en el campo.

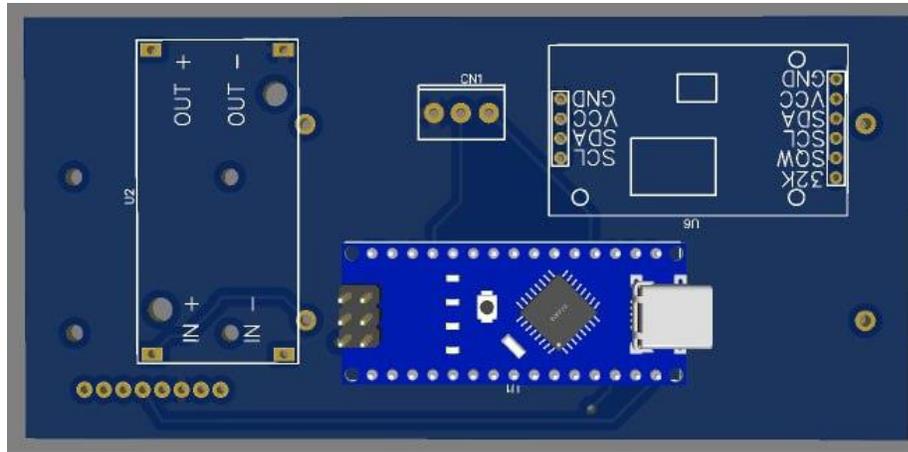


Figura 1. Vista de prototipo final de placa. Fuente: Propia.

En la figura 1, se presenta el prototipo final de la placa de Arduino, como es posible evidenciar, esta, se caracteriza por tener un diseño sencillo, en donde, no se utilizan cables para realizar las conexiones entre componentes, lo que permite que, el sensor tenga una mayor resistencia a las condiciones adversas que se puedan presentar, cabe destacar que, este tipo de placas son diseñadas de forma tal que, es posible enviarlas a construir, acelerando los procesos de ensamblado que se incrementan al utilizar una placa tradicional.

Ahora bien, para el correcto funcionamiento del sensor se tuvo que realizar una programación en el programa Arduino IDE, esta programación se encuentra ubicada en la sección de Anexos, específicamente el Anexo 1, es importante recalcar que, esta programación se diseñó con el objetivo de que, el valor que sea medido a partir del sensor de capacitancia con el que cuenta el prototipo sea almacenado cada 20 minutos, lo que quiere decir que, una vez encendido el sensor, este realizará mediciones cada 20 minutos, por lo que, se debe tener en cuenta estos periodos de tiempo para el análisis de la humedad de los suelos es estudio.

Así mismo, es relevante mencionar que, dentro de la tarjeta microSD se almacenan datos de Capacitancia, dado en Faradios, por lo que, se tuvo que realizar la calibración respectiva, a partir de la cual se logró obtener la ecuación de calibración del sensor, que será utilizada para determinar la humedad gravimétrica de los suelos en estudio. Por lo que, a partir de la toma de muestra se obtuvieron una serie de datos que se mencionaran a continuación.

En primer lugar, se obtuvieron los datos del sensor, mismo que se encuentran en la tabla 1, estos datos, como se mencionó están en unidades de Faradios, así también, se debe

mencionar que, tal y como se puede observar en la tabla 1, estos datos fueron determinados en dos fechas distintas, esto se debe a que, dentro de los procesos de análisis se obtuvieron ciertos errores que ocasionaron la toma de más muestras de suelos, y con ello poder obtener una mayor precisión de los datos.

Tabla 1. Datos obtenidos en el sensor. Fuente: Propia.

Datos Sensor		
Fecha	Hora	Medida
22/11/2022	18:15:41	360,00
22/11/2022	18:32:27	361,00
23/11/2022	10:04:17	363,00
23/11/2022	14:00:10	364,00
23/11/2022	15:07:33	364,00
23/11/2022	15:24:22	364,00
23/11/2022	15:41:11	364,00
23/11/2022	15:58:00	365,00
23/11/2022	15:58:00	365,00
08/12/2022	9:52:26	396,00
08/12/2022	10:17:01	366,00
08/12/2022	10:42:27	381,00
08/12/2022	11:11:09	370,00
08/12/2022	11:37:29	363,00
08/12/2022	12:02:29	365,00
08/12/2022	13:47:01	361,00
08/12/2022	14:27:11	360,00
08/12/2022	14:47:30	371,00
08/12/2022	16:11:26	372,00

Asimismo, las horas en las cuales se recopilaron los datos del sensor se relacionan con los tiempos que el prototipo almacenó en la tarjeta SD y en ese mismo momento se tomaron las muestras en el suelo en estudio.

Tabla 2. Datos de muestras tomadas. Fuente. Propia.

Datos Muestras		
Fecha	Hora	Psh+Cilindro+Bandeja
22/11/2022	18:20	573,33
22/11/2022	18:35	583,52
23/11/2022	9:50	524,73
23/11/2022	14:05	503,57
23/11/2022	15:05	547,66

23/11/2022	15:20	523,54
23/11/2022	15:35	490,50
23/11/2022	15:50	527,16
23/11/2022	16:05	506,75
Fecha	Hora	Psh+Cilindro
08/12/2022	9:55	481,2
08/12/2022	10:20	545,7
08/12/2022	10:50	508,7
08/12/2022	11:15	558,7
08/12/2022	11:40	459,5
08/12/2022	13:25	532,3
08/12/2022	13:50	533,1
08/12/2022	14:30	454,1
08/12/2022	15:50	470,8
08/12/2022	16:15	575,9

En la tabla 2 se muestran los datos relacionados con el peso de las muestras tomadas en campo, como es posible conocer, estos pesos deben de llevar a cabo un procedimiento de análisis en laboratorio, para a partir de lo cuál es posible conocer el contenido de humedad gravimétrica en el suelo y con ello concretar el proceso de calibración, por tanto, luego de llevar al horno las muestras tomadas se obtuvieron lo datos mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Porcentaje de Humedad Gravimétrica en el suelo. Fuente. Propia.

Datos Muestras				
Fecha	Hora	Psh	Pss	%HG
22/11/2022	18:20	195,57	175,40	11,50
22/11/2022	18:35	207,16	163,16	26,97
23/11/2022	9:50	211,88	178,91	18,43
23/11/2022	14:05	197,13	158,74	24,18
23/11/2022	15:05	222,36	179,05	24,19
23/11/2022	15:20	217,31	177,19	22,64
23/11/2022	15:35	165,44	137,26	20,53
23/11/2022	15:50	205,08	166,54	23,14
23/11/2022	16:05	149,49	110,64	35,11
08/12/2022	9:55	184,79	126,01	46,65
08/12/2022	10:20	199,70	146,50	36,31
08/12/2022	10:50	196,36	146,33	34,19
08/12/2022	11:15	190,58	126,61	50,53

08/12/2022	11:40	161,21	123,13	30,93
08/12/2022	13:25	164,09	113,48	44,60
08/12/2022	13:50	163,90	129,37	26,69
08/12/2022	14:30	138,78	109,96	26,21
08/12/2022	15:50	168,50	119,09	41,49
08/12/2022	16:15	209,36	148,97	40,54

Como es posible notar, en la tabla 3 se determinó el porcentaje de humedad gravimétrica, este porcentaje se obtuvo a partir de la aplicación de la ecuación 1, ahora bien, como es posible evidenciar, dentro del conjunto de datos hay diferencias significativas, lo que, lo que provoca que entre datos exista una variación real de los datos de humedad.

A partir del análisis de los valores encontrados en la tabla 3, se logró obtener que, el promedio de la humedad gravimétrica en el suelo en estudio es del 30,78% con una desviación estándar entre datos de alrededor de 10,5; esto significa que, existen diversos valores que se alejan de la media calculada, en este caso en particular, la medición realizada el 22/11/2022 al ser las 6:20 pm, se aleja completamente de la media, por lo que, a partir de los criterio estadísticos que se tiene puede ser eliminada, así también, el porcentaje de humedad del 08/12/2022 a las 11:15; la eliminación de estos valores permitió que la desviación estándar bajará, lo que permitió saber que, la mayoría de datos presentados se encuentran cerca de la media calculada, de igual manera, fue relevante realizar un análisis en relación con los valores obtenidos y las gráficas correspondiente, por lo que, gracias a la gran cantidad de muestras que se tomaron se logró realizar una eliminación de aquellos valores que no se encontraron cercanos a la media.

Finalmente, una vez determinados los valores de forma concreta se realizó una gráfica en donde se ubicó el porcentaje de humedad gravimétrica versus la capacitancia del sensor, a partir de lo cuál se determinó la ecuación de calibración respectiva, que mostró un coeficiente de determinación (r^2) de 0,6251.

La gráfica mencionada se realizó con base a los valores que se encuentran en la tabla 4, y que se muestra a continuación.

Tabla 4. Valores finales de capacitancia y humedad gravimétrica. Fuente. Propia.

Capacitancia	%HG
360,00	26,2095
361,00	26,8291

363,00	30,9267
365,00	34,2845
366,00	36,3140
371,00	41,4896
372,00	40,5384
381,00	34,1898
396,00	46,6471

Los valores que se encuentran en la tabla 4 constituyen las cifras editadas a partir de las reconversiones que se realizaron, y con base en el cumplimiento de diferentes conceptos estadísticos que facilitaron el correcto análisis de los datos.

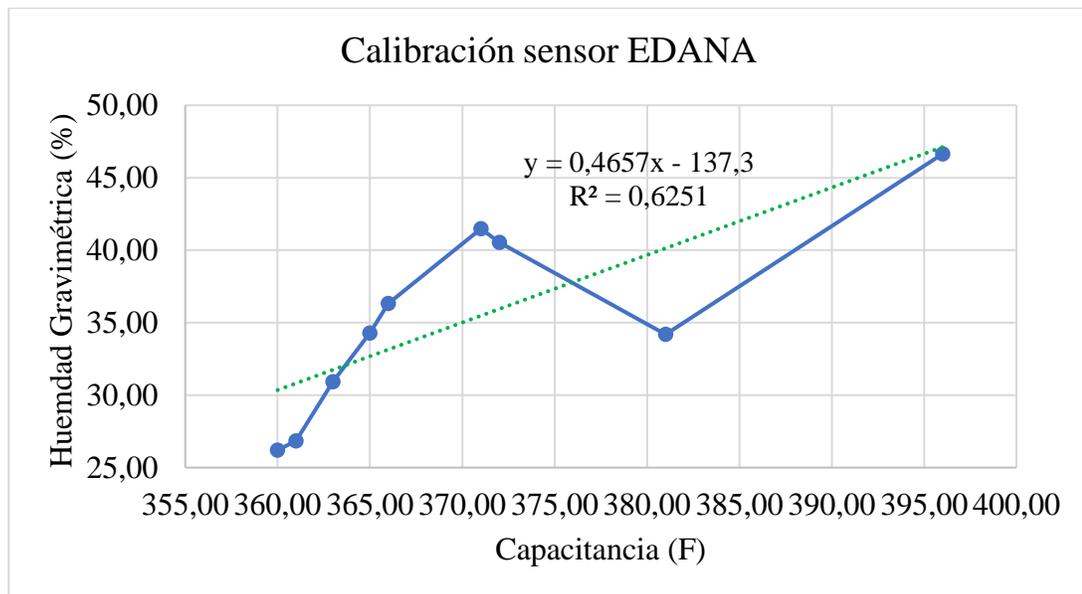


Figura 2. Gráfica de determinación de ecuación de calibración del sensor. Fuente. Propia.

En la figura 2 se encuentra la gráfica generada a partir de los datos de la tabla 4, como bien se puede observar, a partir de la graficación fue posible obtener la línea de tendencia de los datos, misma que se caracteriza por tener una ecuación de recta, dado por:

$$y = 0,4657 \times x - 137,3 \quad \text{ecuación 2}$$

Donde:

$y =$ Porcentaje de Humedad Gravimétrica

$x =$ Capacitancia

A partir de esta ecuación es posible obtener los valores de Humedad Gravimétrica de un suelo, con una diferencia de ± 2 , lo que quiere decir que, una vez aplicada la ecuación 2, la diferencia que se puede generar entre los valores reales y los obtenidos a partir de la ecuación correspondiente podrían tener una variación, aspecto que es relevante considerar para términos de toma de decisiones.

Una vez concluido el proceso de calibración respectivo el sensor se encuentra listo para su operación dentro del campo, por lo que, se debieron establecer los precios correspondientes a cada uno de los componentes de la placa, y demás aspectos que son relevantes analizar para la gestión de fondos en cuanto a la construcción de este.

Tabla 5 5. Costos del sensor. Fuente. Propia.

Producto	Costo (\$)
Caja	14,50
Baterías	13,50
Arduino	13,00
Lector y escritor de micro USB	13,00
Diseño	12,00
Cargador de las baterías	8,00
Sensor	6,00
Reloj	6,00
Regulador	5,00
Base de la batería	3,00
Placa	2,00
Conector para el sensor	2,00
Batería de reloj	1,50
Terminal del sensor	0,50
Total	100

A partir de la tabla 5 se puede notar que, el precio del sensor de humedad es de 100 dólares, este costo implica el costo de cada uno de los componente que se deben utilizar para la construcción del sensor de humedad EDANA, ahora bien, es importante recalcar que, este costo es realmente aceptable, considerando que, en el mercado, el costo mínimo encontrado para un sensor de humedad es de aproximadamente 189.30 euros, lo que equivale a 196

dólares, lo que permite decir que, el sensor construido es un prototipo aceptable en aspectos económicos, y así mismo, permite obtener datos realmente relevantes en cuanto a las condiciones de humedad de los suelos en estudio.

Conclusiones

Según los resultados obtenidos se logra concluir que el sensor fue creado con una programación determinada y funcional, la cual consta de un algoritmo Arduino que permite detectar los datos de capacitancia y almacenarlos según la hora y día exacto en el cual fueron tomados, convirtiéndolo así en un producto útil, capaz de realizar las tareas deseadas. Así mismo, al realizar el proceso de calibración del sensor, se obtiene una determinada ecuación de calibración y con ello se evidencia que el coeficiente de determinación obtenido es de 0,6251, mostrando así que la varianza total reflejando el ajuste del modelo a la variable.

Finalmente, se determina que el sensor EDANA se caracteriza por ser un producto mínimo viable, lo cual lo establece como un producto de confiabilidad media, pero de un costo muy bajo a comparación de diversos sensores transitados en el mercado.

Recomendaciones

- Asegurarse que el sensor este bien conectado a la hora de utilizarlo.
- Verificar con regularidad que los sensores del sensor estén funcionando correctamente.
- Conocer el estado de las baterías, y mantenerlas cargadas para que el sensor funcione correctamente.
- Conocer el estado de las baterías del reloj, para que este funcione correctamente.
- Asegurarse que la tapa del sensor este correctamente cerrada para realizar la toma de datos.
- Revisar que la tarjeta SD este bien colocada, para que el sensor guarde los datos correctamente.
- Se recomienda verificar el tiempo en el cual el sensor toma los datos y si es necesario modificarlo según las necesidades de la tarea realizar.

Bibliografía

- Aranda, D. et al. (2022). Calibración y caracterización de sensores capacitivos de bajo coste para la monitorización de humedad de suelo. XLIII Jornada de Automática, 479-485. <http://hdl.handle.net/2183/31462>
- Martínez Inca, M. (2021). Análisis comparativo entre la humedad gravimétrica y la humedad determinada con sensores electrónicos en suelos granulares del cantón Ambato. Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32494>
- Sánchez, E, et al. (2019). Calibración de sensor de humedad aplicado a sustrato de fibra de coco comercial comandado por programación en ARDUINO. Especial, 5, 92-99. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.0.2392>
- Villacrés Chérrez, R. (2022). Análisis comparativo entre la humedad gravimétrica y la humedad determinada con sensores electrónicos en suelos finos del cantón Pastaza. Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/36502>

Anexos

Anexo 1. Programación en Arduino IDE

```
#include <RTClib.h>

#include <Wire.h>

#include <SD.h>

#include <SPI.h>

RTC_DS3231 rtc;

File archivo;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, OUTPUT);
  digitalWrite(2, HIGH);
  pinMode(3, OUTPUT);
  if (!rtc.begin())
  {
    Serial.println("No hay un módulo RTC");
    while (1);
  }
  // rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  Serial.print("Iniciando tarjeta SD...\n");
  if (!SD.begin(4))
  {
```

```

Serial.print("No se pudo iniciar la tarjeta SD...");
while (1);
}
archivo.println(" ");
Serial.println("Tarjeta SD iniciada con éxito...");
}
void loop()
{
DateTime now = rtc.now();
archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
if (archivo)
{
archivo.print(now.hour());
archivo.print(":");
archivo.print(now.minute());
archivo.print(":");
archivo.print(now.second());
archivo.print(",");
archivo.print(now.day());
archivo.print("/");
archivo.print(now.month());
archivo.print("/");
archivo.print(now.year());
archivo.print(",");
archivo.println(" ");
digitalWrite(3, HIGH);
delay(5000);
}
}

```

```
archivo.close();
digitalWrite(3, LOW);
}
else
{
Serial.println("Error al abrir el archivo...");
}
Serial.print("HORA --> ");
Serial.print(now.hour());
Serial.print(":");
Serial.print(now.minute());
Serial.print(":");
Serial.print(now.second());
Serial.print(" FECHA --> ");
Serial.print(now.day());
Serial.print("/");
Serial.print(now.month());
Serial.print("/");
Serial.print(now.year());
delay(55000);
}
```

APÉNDICE 7. Galería de fotografías del proyecto







APÉNDICE 9. Taller de campo con productores y funcionarios de AGRINNOVACIÓN



Figura AP9.1. Taller de campo con productores y funcionarios de AGRINNOVACIÓN

