



“ Por un Desarrollo Agrario
Integral y Sostenible ”

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE

Trabajo de Graduación

**Desarrollo de un sensor de humedad de suelo para sistemas
de riego automatizados**

AUTOR

Br. Oscar Santiago Velásquez Muñoz

ASESORES

Ing. Yader Mayquel Barrera Rivera

Ing. MSc. Henry Alberto Duarte

Managua, Nicaragua

Junio, 2021

El presente trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable tribunal examinador designado por la decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERIA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Miembros del tribunal examinador

PhD. Fernando Mendoza Jara
Presidente

Ing. Ernesto Tünnermann Gutiérrez
Secretario

Ing. Norland Méndez Zelaya
Vocal

Managua, Nicaragua
Junio, 2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
III. MATERIALES Y MÉTODOS	4
3.1. Ubicación del experimento	4
3.2. Condiciones climáticas del estudio	4
3.3. Diseño Metodológico	5
3.3.1. Etapa I: diseño	6
3.3.2. Etapa II: Construcción	7
3.3.3. Etapa III: Calibración	8
3.4. Costos	13
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
4.1. Características del sensor	14
4.2. Circuito eléctrico	15
4.3. Micro controlador	15
4.4. Código	16
4.5. Proceso de Calibración	17
4.6. Propuesta de sistema de automatización y control de un sistema de riego por goteo	20
4.6.1. Fuente de alimentación energética del sistema	21
4.6.2. Sistema de automatización y control	21
4.7. Costo del sistema de automatización y control de un sistema de riego	22

V. CONCLUSIONES	24
VI. RECOMENDACIONES	25
VII. LITERATURA CITADA	26
VIII. ANEXOS	27

DEDICATORIA

A Dios.

Por permitirme llegar hasta este punto, con salud y fortaleza para lograr culminar uno de mis objetivos.

A mi madre Isabel Muñoz Hernández.

Por brindarme su apoyo incondicional, por sus consejos y por siempre estar ahí en los momentos en que más la necesitaba.

A mi esposa Cristina Araica.

Por acompañarme en momentos difíciles, por escucharme y darme ánimos para seguir adelante.

A los jóvenes que no pudieron cumplir sus sueños.

A ellos que, por estar haciendo lo correcto se les fue negado el derecho de estudiar, valientes, insurgentes, capaces de cambiar el rumbo de todo un país.

A mi grupo de A18.

Porque al día de hoy siguen luchando por lo justo, incansables, tenaces, pero sobre todo con ganas de cambiar el significado de “universidad”.

A mis compañeros de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables generación 2013.

Por todos esos años en que convivimos y aprendimos juntos, por los recuerdos de las giras de campo, las tardes en el bosque de Neem y las noches de desvelos.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por ponerme en el camino correcto para lograr culminar esta carrera de la mejor manera.

A mi madre por estar siempre pendiente de mí y darme las herramientas necesarias para poder llegar hasta aquí.

A mis asesores Ing. Yader Mayquel Barrera Rivera e Ing. MSc. Henry Alberto Duarte por su gran apoyo, paciencia y enseñanzas durante el período de la realización del trabajo de investigación.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro

Cuadro 1. Cantidad de materiales utilizados para la construcción	13
Cuadro 2. Costo del sistema de automatización y control de un sistema de riego	23

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA

Figura 1. Mapa de ubicación del Laboratorio de Investigación y Energía Renovables (LIDER).....	4
Figura 2. Esquema del proceso metodológico.....	5
Figura 3. Simulación de electrodos en contacto con el suelo.....	7
Figura 4. Software Arduino.....	9
Figura 5. Propiedades hidrofísicas del suelo (Sensacultivo 2018).....	10
Figura 6. Esquema del proceso de calibración.....	11
Figura 7. Modelo de sistema de automatización y control de un sistema de riego por goteo.....	13
Figura 8. Estructura interna y externa del sensor.....	14
Figura 9. Simulación y control del circuito eléctrico para el funcionamiento del sensor de humedad de suelo.....	15
Figura 10. Algoritmo de programación del sensor de humedad de suelo.....	17
Figura 11. Curva comparativa del sensor de humedad de suelo sin aislante y el sensor de humedad comercial.....	18
Figura 12. Pruebas en muestra de suelo seco.....	18
Figura 13. Curva comparativa del sensor de humedad de suelo con aislante y el sensor de humedad comercial.....	18
Figura 14. Curva comparativa del sensor de humedad de suelo y el sensor de humedad comercial, en el invernadero de la finca Las Mercedes.....	19
Figura 15. Toma de datos en invernadero.....	20
Figura 16. Evaluación del desempeño del sensor de humedad de suelo según las propiedades hidrofísicas del suelo.....	20
Figura 17. Propuesta de sistema de automatización y control de un sistema de riego por goteo.....	22

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO

Anexo 1. Formato para la toma de datos.	27
Anexo 2. Sensor de humedad de suelo comercial.	27
Anexo 3. Validación del sensor de humedad de suelo en invernadero	27

RESUMEN

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Innovación y Desarrollo de Energía Renovables (LIDER) perteneciente a la Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua en donde se diseñó y analizó un sensor de humedad de suelo para sistemas de riego automatizados. El objetivo de esta investigación fue diseñar un sensor de humedad de suelo con el que se pudiera automatizar el riego para optimizar el uso del agua en la producción de alimentos. En la construcción del sensor, se utilizaron materiales de fácil acceso en el país, bajo costo y que permitiera obtener datos de la humedad del suelo, un micro controlador Arduino Mega 2560 para el cual se diseñó un algoritmo para estimar la tensión del suelo según el nivel de humedad del suelo. A través de un sensor comercial que utiliza el mismo principio de resistencia eléctrica, se hizo el análisis del nuevo sensor de humedad de suelo obteniendo una curva comparativa que permitiera su puesta en marcha. El análisis se ejecutó con muestras de suelo secas y en el invernadero del Centro de Experimentación y Validación Tecnológico Finca Las Mercedes, UNA Managua. El proceso de análisis permitió contar con un sensor de bajo costo, operado con un sistema de control que operado por Arduino y alimentado energéticamente por un sistema fotovoltaico. Su operación es basada en un código de programación que debe ser alimentado por análisis de laboratorio como son las propiedades hidrofísicas del suelo, Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Límite Productivo (LP), estas variables permite lograr la precisión deseada en la optimización del recurso agua en la producción agrícola. Este sistema construido demanda la continuidad del proceso de validación para lograr la robustez en procesos de operación en campo abierto.

Palabras Clave: Sensor de humedad, propiedades hidrofísicas, Arduino, riego

ABSTRACT

This research was carried out in the Renewable Energy Innovation and Development Laboratory (LIDER) belonging to the National Agrarian University, Managua, Nicaragua, where a soil moisture sensor for automated irrigation systems was designed and analyzed. The objective of this research was to design a soil moisture sensor with which irrigation could be automated to optimize the use of water in food production. In the construction of the sensor, materials of easy access in the country, low cost and that allowed to obtain data on soil moisture were used, an Arduino Mega 2560 microcontroller for which an algorithm was designed to estimate soil tension according to the soil moisture level. Through a commercial sensor that uses the same principle of electrical resistance, the analysis of the new soil moisture sensor was performed, obtaining a comparative curve that would allow its start-up. The analysis was carried out with dry soil samples and in the greenhouse of the Finca Las Mercedes Technological Experimentation and Validation Center, UNA Managua. The analysis process made it possible to have a low-cost sensor, operated with a control system operated by Arduino and powered by a photovoltaic system. Its operation is based on a programming code that must be fed by laboratory analysis such as the hydrophysical properties of the soil, Field Capacity (CC), Permanent Wilt Point (PMP) and Productive Limit (LP), these variables allow achieve the desired precision in the optimization of water resources in agricultural production. This built system demands the continuity of the validation process to achieve robustness in open field operation processes.

Keywords: Moisture sensor, hydrophysical properties, Arduino, irrigation

I. INTRODUCCIÓN

Para el año 2050 se prevé que aumentarán las tensiones en la disponibilidad de agua dulce, se espera que un mayor número de personas (2300 millones de personas, más del 40 % de la población mundial) viva en zonas con estrés hídrico severo, así mismo, se prevé que la demanda mundial de agua (en lo referente a captación de agua dulce) aumente un 55 % debido a la creciente demanda de la industria manufacturera (400 %), la generación de electricidad térmica (140 %) y el uso doméstico (130%) (OCDE 2012).

Actualmente la agricultura representa aproximadamente el 70 % de la captación total de agua dulce a nivel mundial y más del 90 % en la mayoría de los países menos desarrollados. Este es el caso de Nicaragua donde según el científico nicaragüense Salvador Montenegro “las formas de producción agrícola no son muy sanas, ya que se inundan arrozales y cañaverales, además la ganadería utiliza un sistema parecido al que utilizaban los españoles 500 años atrás, causando un gran desperdicio de agua” (Sánchez 2015).

La superficie irrigada ha tenido una importancia limitada y fluctuante en Nicaragua en las últimas cinco décadas, llegando a cubrir entre un mínimo de 1 % (a principios de los 1960s y 1990s) y un máximo 6 % (fines de los 1980s y en 2011) de la superficie agrícola del país. Para el año 2011, Nicaragua habría llegado a tener cerca de 10000 hectáreas bajo riego, es decir un 5.5 % del total del área agrícola del país. Este porcentaje es similar al máximo alcanzado hacia fines de los 1990s o a fines de los 1970s (Zegarra y Chirinos 2016).

Aparte de la poca importancia del uso de sistemas de riego en Nicaragua existe una nula tecnificación del mismo, en comparación a otros países del mundo donde ha surgido una nueva forma de hacer agricultura llamada Agrotecnología (AgTech) la cual tiene por objetivo el uso de soluciones tecnológicas para lograr una agricultura sostenible que lleve a la máxima eficiencia en el uso de recursos naturales (agua, suelo, energía, fertilizantes) y que, además, ofrezca un ahorro de costes. Se trata, en suma, de duplicar el rendimiento sin multiplicar el uso de recursos (Nates 2013).

Como alternativa para el uso sostenible del recurso agua se fomenta la utilización de sistemas de riego eficientes, siendo el riego por goteo el que mejor optimiza el agua en la producción de alimentos. Sin embargo, su eficiencia puede incrementar cuando se automatiza, permitiendo utilizar un volumen óptimo para producir un kg de producto.

Una forma de automatizar el riego es a través de sensores de humedad de suelo ya que al monitorear la humedad se puede tomar mejores decisiones en la programación del riego, tales como el determinar la cantidad de agua a aplicar y cuándo aplicarla. También le puede ayudar a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego; y así evitar pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente. (Enciso M. et al. 2017)

El propósito de éste trabajo de investigación es presentar las primeras bases del uso de la Agro tecnología accesible para el mediano y pequeño productor, con el fin de mejorar la eficiencia del recurso hídrico a través de un sensor de humedad casero que permita estimar la humedad del suelo en tiempo real y que permita dar respuesta a dos preguntas importantes

para el riego ¿Cuándo regar? y ¿Cuánto regar? Así mismo, desarrollar una propuesta para un sistema de riego de precisión donde se optimice el uso de la energía y el recurso hídrico y que garantice una mayor productividad.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Desarrollar un sensor de humedad de suelo de bajo costo para la automatización y control de sistemas de riego, en ambientes controlados y en campo abierto.

2.2. Objetivos Específicos.

- Diseñar un sensor de humedad de suelo y su sistema de control para optimizar el uso del agua en la producción de alimentos.
- Calibrar la funcionalidad del sensor de humedad de suelo en la automatización y control del riego.
- Proponer un sistema de automatización y control del riego, de bajo costo para pequeños y medianos productores.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento

El estudio fue realizado en el municipio de Managua, departamento de Managua, en el Laboratorio de Innovación y Desarrollo de Energía Renovable (LIDER) de la Universidad Nacional Agraria, latitud 12.1483° N y Longitud 86.1611° O (ver figura 1).

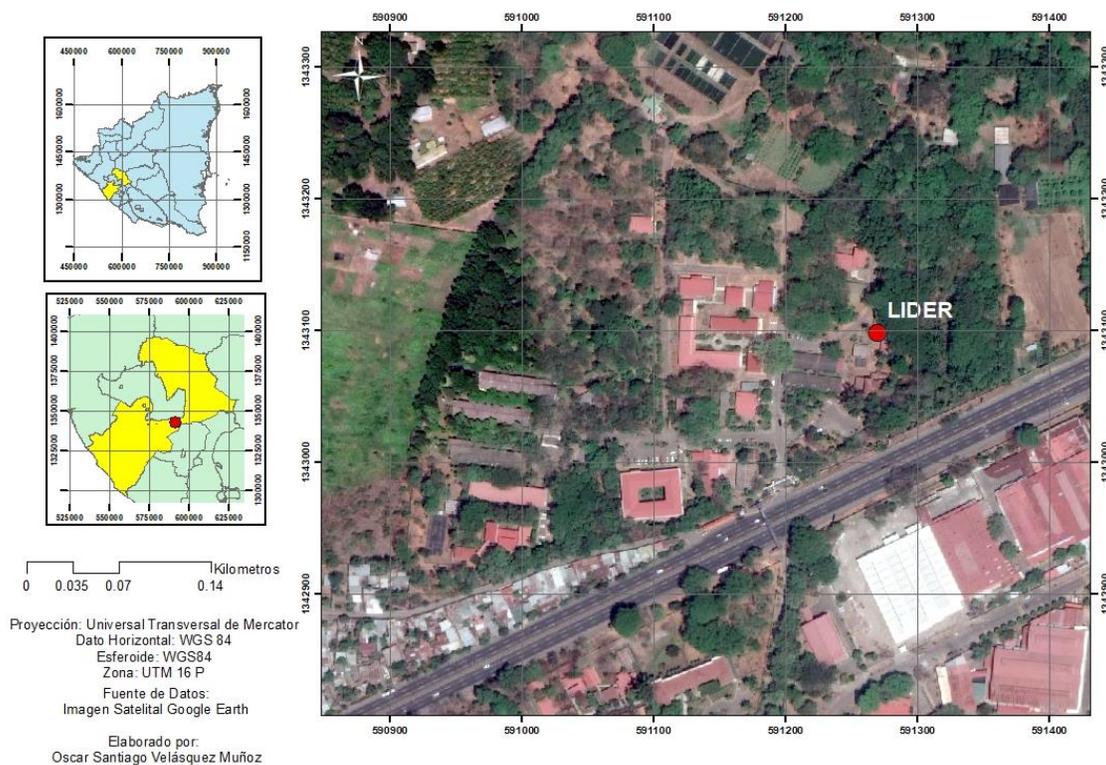


Figura 1. Mapa de ubicación del Laboratorio de Investigación y Energía Renovables (LIDER)

3.2. Condiciones climáticas del estudio

➤ Clima

El clima en la zona de estudio, se caracteriza por tener temperaturas cálidas durante todo el año, posee una marcada estación seca que va desde mayo a noviembre, siendo pocos los meses de lluvia, según la clasificación (Koppen 1993). Los datos de las variables climáticas, fueron obtenidos de los registros históricos de la estación meteorológica Aeropuerto Internacional Augusto César Sandino.

➤ **Temperatura**

La temporada calurosa dura 6 meses, desde noviembre a abril, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 34° C y una temperatura mínima promedio de 24° C (INETER 2018).

➤ **Precipitación**

La temporada de lluvia dura 7 a 8 meses, del 12 de mayo al 7 de diciembre, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia de por lo menos 13 mm. La mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 25 de septiembre, con una acumulación total promedio de 178 mm. (INETER 2018)

3.3. Diseño Metodológico.

El diseño metodológico del estudio fue ejecutado siguiendo el siguiente esquema.

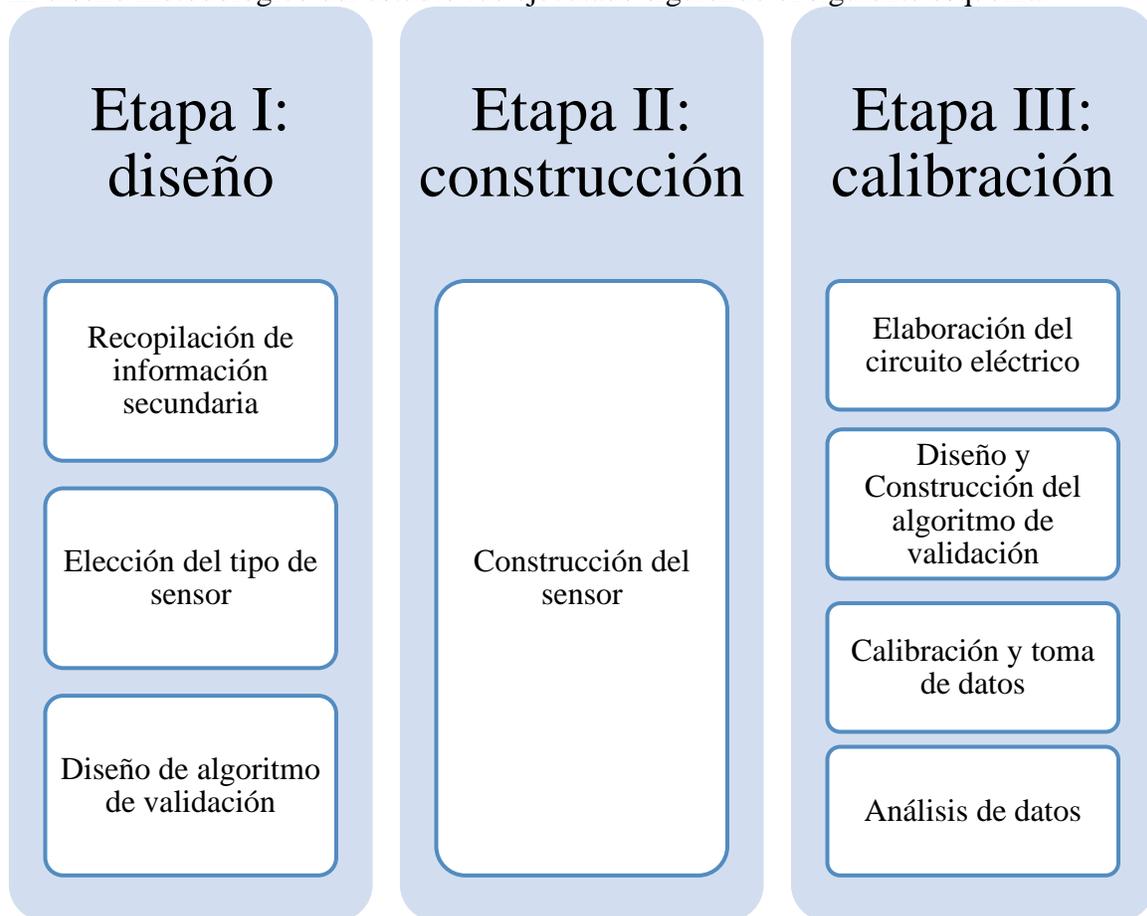


Figura 2. Esquema del proceso metodológico.

3.3.1. Etapa I: diseño

Recopilación de información secundaria

En esta etapa se hizo una investigación sobre los tipos de sensores que existen en la actualidad, su estructura y funcionamiento. Características eléctricas de los materiales que pudieran ser útiles para la construcción del sensor.

Elección del tipo de sensor

Para el diseño fue necesario conocer los métodos para medir humedad, de los cuales se describen los siguientes:

- Método del tacto: Al apretar la tierra entre el pulgar y el dedo índice o al exprimir la tierra en la palma de la mano, se puede obtener una estimación bastante aproximada de la humedad en el suelo
- Sonda de neutrones: Una sonda de neutrones contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos. Estos neutrones rápidos son aproximadamente del tamaño de un átomo de hidrógeno, un componente esencial del agua. Cuando los neutrones rápidos chocan contra los átomos de hidrógeno, se vuelven más lentos. Un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan. Esta relación se usa entonces para estimar el contenido de la humedad en el suelo. Sin embargo, debido a que cada suelo tiene otras fuentes de hidrógeno que no están relacionadas con el agua, es importante calibrar la sonda para cada suelo
- Tensión del suelo: Los tensiómetros miden la intensidad de la fuerza con la que el suelo retiene el agua. La mayoría de los tensiómetros tienen una punta de cerámica o porosa conectada a una columna de agua. Los tensiómetros son instalados a la profundidad deseada. A medida que el suelo se seca, comienza a jalar agua de la columna de agua a través del bulbo de cerámica, provocando succión en la columna de agua. Esta fuerza se mide entonces con un indicador de succión.
- Termómetros de luz infrarroja: De igual forma que las personas sudan para mantenerse frescas, las plantas transpiran a través de unas aberturas llamadas estomas. Una vez que las plantas comienzan a sufrir de estrés hídrico, comienzan a cerrar sus estomas y dejan de transpirar provocando que la planta “se caliente” y la temperatura de las hojas aumente. Con las lecturas de rayos infrarrojos se puede detectar este aumento de temperatura en la planta.

- Resistencia eléctrica: El método que se utilizó para diseñar y construir el sensor es el de resistencia eléctrica cuyo principio físico es que el contenido de humedad se puede determinar por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo (Edward 2009).

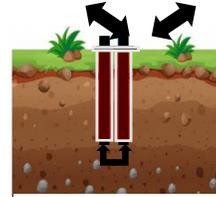


Figura 3. Simulación de electrodos en contacto con el suelo

a. Diseño de algoritmo de Calibración.

Para diseñar este sensor se necesitaba entender la interacción suelo - sensor - microcomputadora, por tal razón fue necesario investigar las propiedades física-químicas del suelo, como estas interactúan sobre la humedad del mismo, conocer sobre los principios básicos de la conductividad eléctrica del suelo y como estos datos se pueden transformar en valores de humedad de suelo haciendo uso de microcomputadoras y el lenguaje de programación.

3.3.2. Etapa II: Construcción

Una vez que se investigó sobre las características eléctricas de los materiales y la movilidad del agua en el suelo se procedió a la construcción del sensor tomando en cuenta las siguientes variables:

- Conductividad del material: La conductividad es de 3×10^6 S/m.

$$R = \rho \frac{A}{L}$$

Donde,

R: Resistencia del material en ohm Ω

ρ : Resistividad del material

A: Área del material

L: Longitud del material en cm

- Resistencia a la corrosión: El acero galvanizado es un excelente material para evitar la corrosión y con esto se evita reducir el bloqueo de la comunicación eléctrica entre los electrodos.
- Longitud del sensor: La longitud de los electrodos del sensor están determinados por la profundidad del sistema radicular del cultivo que se desee establecer. Por lo que la longitud puede ser variable. Para este estudio se construyeron dos modelos, uno para una profundidad de 20 cm y otro para una profundidad de 40 cm.
- Aislamiento de los electrodos: para evitar comunicación eléctrica entre los electrodos del sensor se recubrió cada una de las varillas con un material aislante resistente a la intemperie.
- Aislamiento superior: los electrodos deben estar sujetos a un material que les permita mantenerse fijos y de forma paralela, para lograr la comunicación eléctrica cuando son introducidos al suelo. Este material debe impedir su contacto eléctrico para impedir que envíe señales erróneas que pueden ser consideradas por el lector como señales de

humedad. Tomando esas características se utilizó como material de sujeción, un trozo de tabla de cocina de las que son utilizadas para picar; se seleccionó este material por su capacidad de aislamiento eléctrico y de esta manera reducir el riesgo de contacto entre los electrodos.

- f. Cables de comunicación: para transportar la información que emite el sensor hacia el sistema de control, se utilizó cable coaxial. Este tipo de cable tiene una impedancia de 50, 75 o 93 ohm, representados con las siglas RG, de radiofrecuencia-gobierno. Es muy utilizado en la actualidad, debido a que tiene múltiples aplicaciones en las comunicaciones. Es utilizado para transportar señales de radio, vídeo, así como señales de datos.
- g. Disponibilidad y costo local: se utilizaron materiales que se encuentran en el mercado local y de bajo costo.

3.3.3. Etapa III: Calibración

Elaboración del circuito.

Para lograr el circuito apropiado, se hizo la simulación en Proteus 8 profesional el cual es una aplicación para la ejecución de proyectos de construcción de equipos electrónicos en todas sus etapas: diseño del esquema electrónico, programación del software, construcción de la placa de circuito impreso, simulación de todo el conjunto, depuración de errores, documentación y construcción, con el fin de validar su funcionamiento antes de su puesta en marcha.

Una vez logrado el circuito adecuado, se procede a su puesta en marcha, dicho circuito incluye elementos como, el sensor, resistencias, transistores, Arduino, diodos y fuente de alimentación. El sensor propuesto es de tipo resistivo por lo que recibe y transmite pulsos eléctricos, estos pulsos son enviados a través de un micro controlador (Arduino) quien se encarga de transmitir y recibir información (entrada y salida). El micro controlador envía tensión al sensor de humedad y este la devuelve en valores de mili voltios en dependencia de la conductividad eléctrica del suelo. Esto se puede explicar a través de la siguiente expresión:

$$\text{Tensión} \rightarrow H \leftrightarrow \text{Tensión} \leftarrow H$$

Donde,

Tensión= tensión en mili voltios (mv)

H= humedad (%)

Diseño y Construcción del algoritmo del sensor

- **Tensión:** La energía potencial de los electrones libres, en la terminal positiva de un circuito es menor que la energía potencial de los que se encuentran en la terminal negativa; por tanto, hay una “diferencia de energía potencial”, esta diferencia de potencial es la que crea la presión necesaria para hacer circular la corriente (Harper 1998).

En el caso de este estudio fue necesario medir la tensión que circula por las terminales del sensor, la cual tiene origen en el cierre del circuito que se da una vez que los electrodos entran en contacto con el suelo y más si este va incrementando su porcentaje de humedad.

La tensión fue estimada en mili voltios (mv). Para conocer los valores de tensión fue necesario conectar el micro controlador a una computadora y a través de un software IDE (Integrated Development Environment) se creó un código de programación que permitió leer estos valores (figura 4).

Conociendo el valor de tensión del suelo enviado por el sensor, se codificó un algoritmo que permite al micro controlador tomar la decisión de abrir o cerrar un circuito que acciona una electroválvula por donde pasa el agua proveniente del sistema de almacenamiento hacia el sitio de regadío.

```

voltageFlip
|
#define voltageFlipPin1 7
#define voltageFlipPin2 6
#define sensorPin 0

int flipTimer = 3000;

Compilado
Archivando el núcleo construido (cacheado) en: C:\U
Linking everything together...
"C:\Program Files (x86)\Arduino\hardware\tools\
"C:\Program Files (x86)\Arduino\hardware\tools\
"C:\Program Files (x86)\Arduino\hardware\tools\
"C:\Program Files (x86)\Arduino\hardware\tools\
El Sketch usa 4222 bytes (1%) del espacio de almace
Las variables Globales usan 204 bytes (2%) de la me

```

Figura 4. Software Arduino.

- **Humedad:** con el sensor se requería hacer una estimación del agua que puede ser aprovechada por la planta y que se define como la diferencia entre la humedad a capacidad de campo (retenida a una fuerza de 1/3 de atm) y el punto de marchitamiento permanente (humedad retenida a una fuerza de 15 atm aproximadamente).
- **Capacidad de Campo (CC):** Un suelo se encuentra en capacidad de campo (Cc) cuando se experimenta un equilibrio temporal entre el potencial mátrico (Ψ_m) y el potencial gravitatorio (Ψ_g). También define la capacidad de campo como el estado o nivel de humedad que alcanza un suelo saturado cuando ha cesado el drenaje interno del mismo (Marrero, 2006). La capacidad de campo se obtuvo a través del análisis realizado en Laboratorio de Suelos y Agua (LABSA) de la Universidad Nacional Agraria
- **Punto de Marchitez Permanente (PMP):** es el contenido de agua en el suelo al cual las plantas no se pueden recuperar y se marchitan aun cuando se les adiciona suficiente humedad. El Punto de Marchitez Permanente se obtuvo a través del análisis de Laboratorio de Suelos y Agua (LABSA) de la Universidad Nacional Agraria (ver figura 4).
- **Límite Productivo (LP):** el punto óptimo de humedad que tiene el suelo para un buen desarrollo del cultivo. El Límite Productivo puede ser variable para diferentes especies vegetales y tipos de suelos, es el nivel de humedad mínimo para efectuar el riego. Para este estudio se tomó en cuenta un Límite Productivo como el 70 % de la Capacidad de Campo, basados en las propiedades físicas del suelo en el sitio (Cisnero Almazan 2003).

$$LP = 0.7 * CC$$

Donde,

CC = Capacidad de Campo

- **Humedad Aprovechable (H_a):** Es la diferencia entre Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP). Si se considera que a capacidad de campo la humedad aprovechable es de 100% el punto de marchitez permanente será de 0 %, entonces la lámina máxima que se puede aplicar a un suelo a una profundidad P (Cisnero Almazan 2003).

$$H_a = \frac{(CC - PMP)}{100} * D_a * P$$

Donde,

H_a = Humedad aprovechable ($m^3 ha^{-1}$)

CC= Capacidad de campo (%)

PMP = Punto de marchitez permanente (%)

D_a = Densidad aparente ($g cm^{-3}$)

P = Profundidad de suelo (m)



Figura 5. Propiedades hidrofísicas del suelo (Sensacultivo 2018)

Los valores de las variables antes descritas, permiten diseñar un algoritmo único para cada tipo de suelo, con el fin de garantizar un óptimo uso del agua y poder responder a dos preguntas fundamentales:

a) ¿Cuándo regar?

Cuando el sensor haga una estimación en tiempo real de la humedad del suelo y evite que el suelo llegue a un nivel de humedad por debajo del Límite Productivo.

b) ¿Cuánto regar?

Cuando el sensor haga una estimación en tiempo real de la humedad del suelo y esta llegue a un nivel de humedad igual o superior a la capacidad de campo.

Considerando estos datos se diseñó un algoritmo que permitiera conocer los valores de tensión y convertirlos en porcentaje de humedad de suelo. Si el valor obtenido es menor al valor del Límite Productivo (obtenido previamente) se permitirá el paso de corriente eléctrica que pueda abrir un electro válvula, para que comience el riego.

Este riego durará hasta que el porcentaje de humedad iguale o supere la capacidad de campo (obtenido previamente). En caso de que el porcentaje de humedad obtenido se encuentre en el rango entre el Límite Productivo y la Capacidad de Campo, no se llevará a cabo ninguna acción, siguiendo la toma de datos cada intervalo de tiempo programado.

De la finca Las Mercedes, se obtuvieron datos de CC, LP y PMP, de estudios de laboratorio realizados anteriormente en el suelo donde se haría el proceso de validación del sensor. Esta información permitió suministrarle al código de programación datos que le permitiera conocer los rangos óptimos de humedad de suelo. Es necesario conocer estos valores cada vez que se desee utilizar este sensor en algún suelo de interés

Calibración y toma de datos del sensor

Para la calibración del sensor en estudio, se utilizó un sensor de humedad de suelo comercial (moisture probe meter mpm-160-b) el cual utiliza valores de tensión del suelo para estimar el porcentaje de humedad. Esta validación se hizo en dos fases:

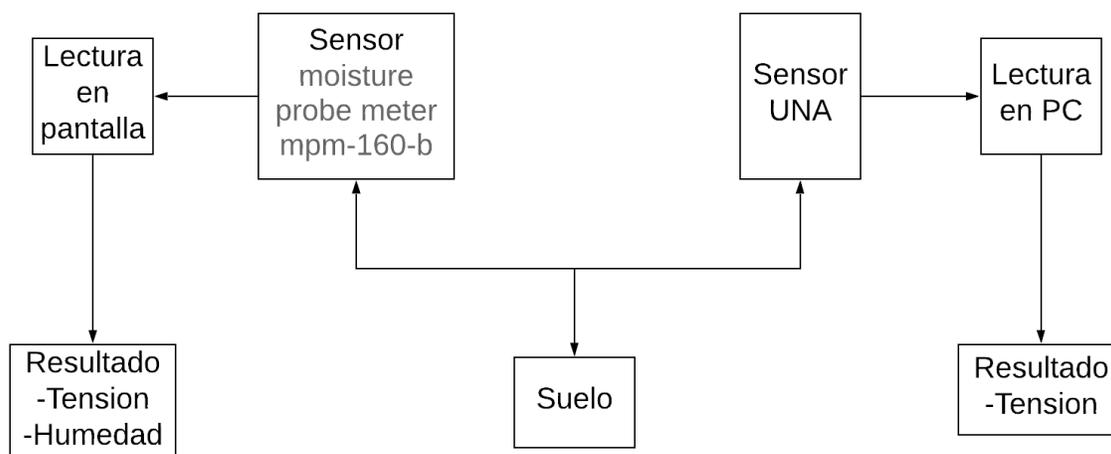


Figura 6. Esquema del proceso de calibración

Calibración en muestras controladas

Se realizó en los meses de agosto – septiembre, utilizando muestras de suelo secas y almacenadas. El suelo seco se depositó en recipientes donde se introducían ambos sensores y cada 5 minutos se agregaba agua, en ese momento se hacían las mediciones de tensión y porcentaje de humedad. Los valores de las mediciones de humedad, se mostraban en pantalla del sensor comercial y en pantalla de pc para el sensor artesanal. (Figura 6.)

Calibración en campo

Los muestreos en campo se realizaron entre los meses de octubre y noviembre. Se inició las mediciones el sector norte de la UNA (área de experimentos agrícolas del sector norte de la universidad) y el segundo punto, en la finca experimental “Las Mercedes”, en esta última se dispone de análisis de suelo de laboratorio.

En ambos sitios se hicieron mediciones con los dos sensores a una separación de 5 centímetros entre cada uno con el propósito de lograr mayor homogeneidad en la información.

En el sector norte de la UNA se hicieron mediciones en 11 sitios, cada 10 minutos con 5 repeticiones de cada lectura. En la finca las Mercedes se hicieron mediciones en 12 sitios (6 dentro del invernadero y 6 en campo abierto) cada 10 minutos y 5 repeticiones. En los dos sitios se agregó agua al suelo para incrementar el porcentaje de humedad y hacer la verificación de ese incremento utilizando ambos sensores.

Toma de datos

El código en Arduino estaba programado para obtener lecturas de tensión cada 4 segundos y en cada sitio se obtuvieron 10 datos de los cuales solo se tomaban el máximo y el mínimo con el propósito de conocer la variación de voltaje en el punto de muestreo. Esto se hizo con el fin de ir sistematizando los posibles errores de diseño, construcción y operación del sensor y posteriormente hacer los ajustes necesarios. Los datos se recolectaron en una hoja de campo (Anexo 1.)

Análisis de datos

Los datos se analizaron utilizando el programa Excel, haciendo una comparación de los resultados de tensión y humedad obtenidos por el sensor de humedad comercial y los valores de tensión del sensor de humedad de suelo propuesto.

3.4. Costos

Se realizó una estimación de los costos incurridos en la construcción y validación del sensor, para esto fue necesario utilizar información sobre los materiales a utilizar, cantidad, costo unitario, costo total, costo por mano de obra, costo por servicios básicos. En cuanto al costo de materiales se utilizó el formato que se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Cantidad de materiales utilizados para la construcción

Material	Unidad	Costo Unitario	Costo total

3.5. Modelo de automatización propuesto.

Se hace una propuesta de modelo de automatización y control del riego que integra un componente de alimentación energética (corriente directa), el sensor de humedad de suelo, sistema de control y válvula solenoide normalmente cerrada (corriente directa) (figura 7.)

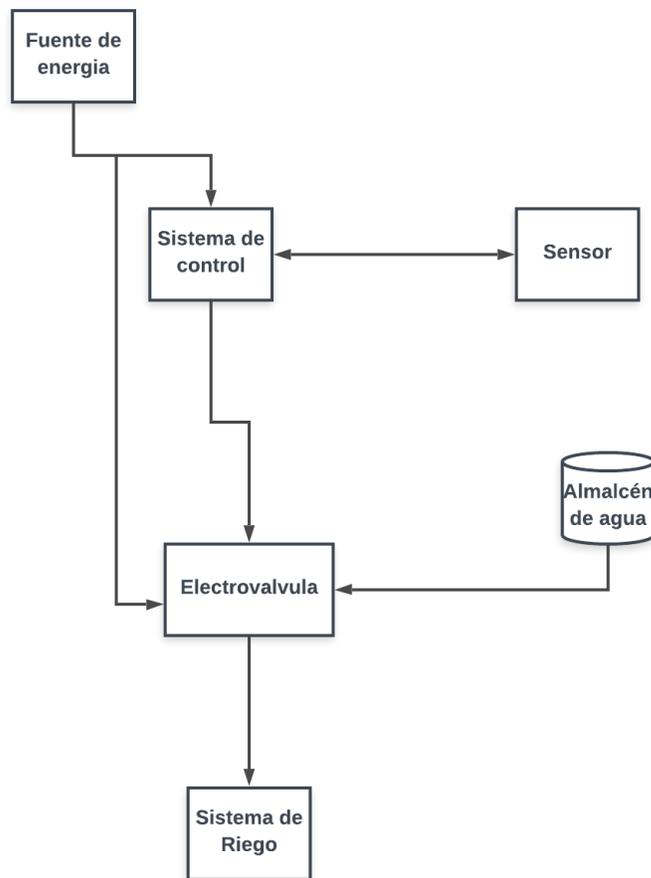


Figura 7. Modelo de sistema de automatización y control de un sistema de riego por goteo

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características del sensor

Se construyó un sensor que consta de las siguientes partes:

Electrodos: Compuestos de 2 varillas roscadas de acero galvanizado de 1/4 de pulgadas de ancho y una longitud de 20 cm; ambas están recubiertas por un aislante eléctrico y separadas perpendicularmente a una distancia de 3 cm. La resistividad de estos electrodos es de 3×10^{-11} Ohm.

Aislante eléctrico: Se utilizaron tubos de caucho Nitrilo también conocido como NBR, como aislante. Fue seleccionado por su resistencia a temperaturas extremas (de -40°C a 108°C), buena resistencia a la flexión y buenas propiedades mecánicas (Quiminet 2012), estos tienen un ancho interno de 1/4 de pulgada y 20 mm de ancho exterior. (Figura 8.)

Aislamiento superior: Su objetivo fue separar ambos electrodos y mantenerlos en una posición perpendicular. El material utilizado para el aislamiento fue el plástico polietileno, este material es utilizado en productos del hogar como tablas de picar.

Entre sus principales características están:

- Excelente resistencia a los químicos corrosivos.
- No absorbe humedad.
- Excelente resistencia al impacto.
- Termo formable, termo doblable, soldable y atornillable.
- Fácil de manejar, maquinar y construir.
- Este tiene un largo y ancho de 10 X 10 cm y un grosor de 12 mm.

Cable coaxial: Su función es la transmisión de información en doble sentido, tanto al sensor como al micro controlador, se utilizaron dos cables de 20 m, conectados a la placa y a los extremos de los electrodos.

Transporte de información

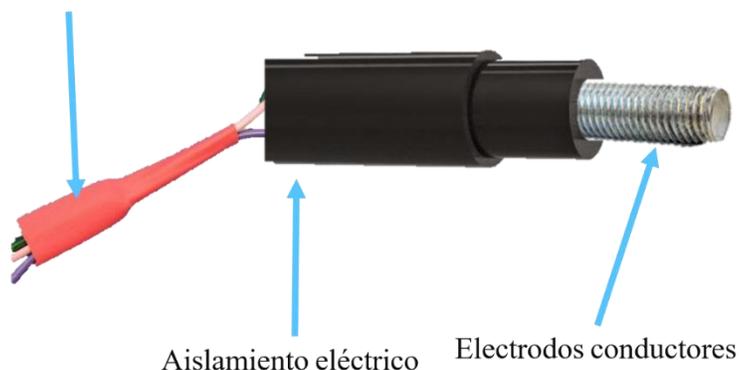


Figura 8. Estructura interna y externa del sensor.

4.2. Circuito eléctrico

La simulación del circuito se hizo utilizando el software Proteus 8. Se seleccionó este programa porque permite la ejecución de proyectos electrónicos, obteniendo su esquema, su programación, construcción del circuito, simular el conjunto de todo el proyecto, identificar posibles errores en campo y permitir la puesta en marcha del proyecto.

Esta simulación permitió organizar todos los elementos que componen el circuito eléctrico (figura 8.) para dar inicio a la construcción y validación del sensor.

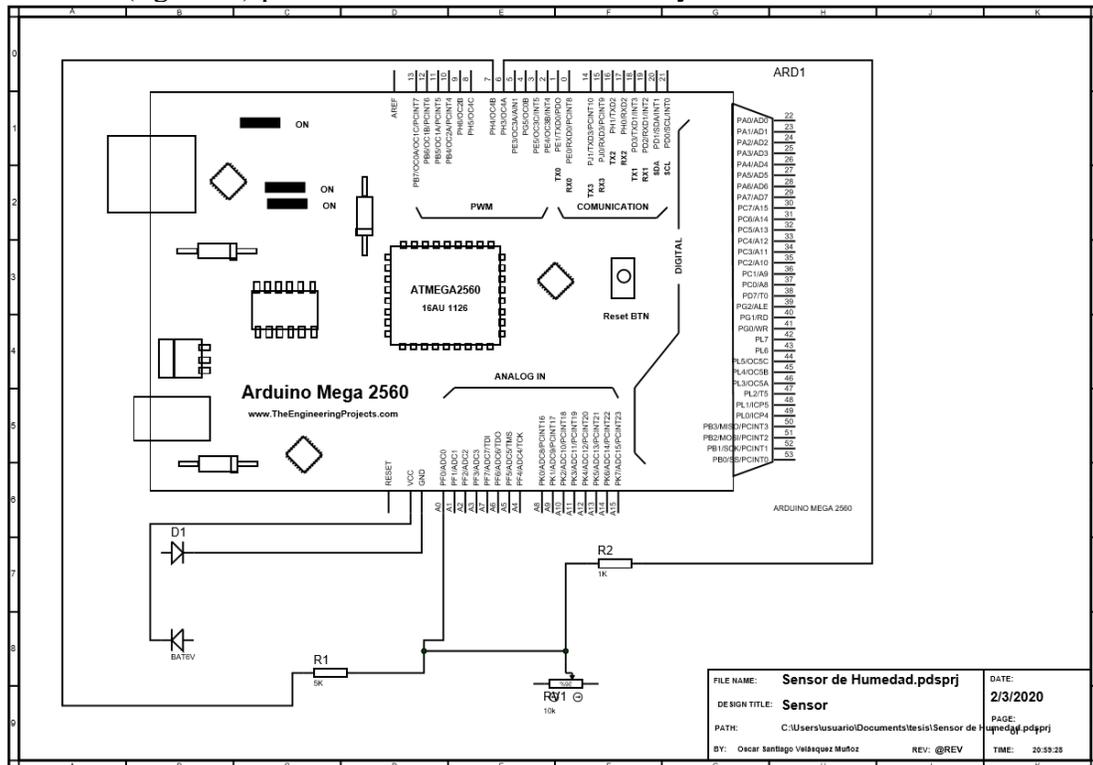


Figura 9. Simulación y control del circuito eléctrico para el funcionamiento del sensor de humedad de suelo.

4.3. Micro controlador

El micro controlador que se utilizó fue Arduino Mega 2560 el cual es una tarjeta de desarrollo de Hardware libre construida con el **micro controlador Atmega 2560**, que le da sentido a su nombre. Forma parte del proyecto Arduino que involucra una comunidad internacional dedicada al diseño y manufactura de placas de desarrollo de Hardware.

El Arduino Mega 2560 tiene 54 pines de entrada/salida, de los cuales exactamente 14 de ellos pueden ser utilizados como salidas de PWM (Modulación por ancho de pulso), cuenta con otras 16 entradas analógicas y 4 UARTs (puertos serial).

En cuanto a la velocidad del micro controlador se puede decir que cuenta con un Cristal de 16MHz y una memoria Flash de 256K. Maneja un rango de voltaje de entrada de entre 7 y 12 volt. Se recomienda una tensión de entrada planchada en 9 Volt.

La comunicación entre la tarjeta Arduino y la computadora se establece a través del puerto serie el cual cuenta con un convertidor interno USB – SERIE de manera que no es necesario agregar ningún dispositivo externo para programar el micro controlador. (Veloso, 2018)

4.4. Código

El riego agrícola adquiere su verdadera importancia cuando la programación del mismo es la correcta: ello implica determinar adecuadamente el periodo de tiempo entre riegos sucesivos y la cantidad de agua aplicada en cada periodo (Schugurens y Capraro 2013). Para determinar la frecuencia del riego y la cantidad de agua aplicada se utilizó el Arduino en conjunto con el sensor, esto es posible ya que el Arduino envía un valor de tensión al extremo superior de uno de los electrodos del sensor que a su vez se transporta en toda la longitud del mismo hasta llegar al suelo donde por conductividad eléctrica pasa de un electrodo al otro, siendo este paso en donde se mide la humedad del suelo, lo cual es posible ya que el suelo aplica una resistencia al paso de corriente eléctrica, dando como resultado un valor de tensión menor al que fue transmitido por el Arduino siendo este valor devuelto a través del segundo electrodo.

Esta diferencia de tensión es lo que nos permite conocer que tanta humedad está presente en el suelo al momento de realizar la medición, por lo tanto mediante esta información se puede programar la activación del riego cuando el valor de tensión está en un rango que es igual o menor al límite productivo (LP) de ese suelo, haciendo que el micro controlador permita el paso de corriente eléctrica hacia la electroválvula, esta permanece encendida siempre y cuando las lecturas de tensión sea menor al valor programado que representa la Capacidad de Campo (CC), cuando este valor sea igualado o superado automáticamente el micro controlador cortara el paso de corriente de la electroválvula haciendo que se cierre. (Figura 10.)

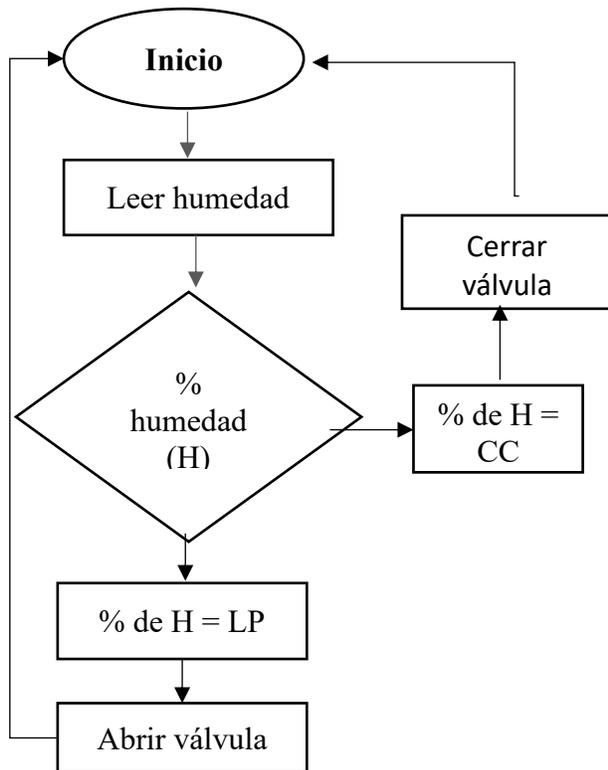


Figura 10. Algoritmo de programación del sensor de humedad de suelo

Desempeño del sensor de humedad de suelo

El desempeño del sensor de humedad de suelo se muestra a partir del análisis de la curva de calibración y la determinación de las propiedades hidrofísicas del suelo.

4.5. Proceso de Calibración

En las muestras de suelo seco, el sensor de humedad de suelo propuesto no presentó variaciones de voltaje, aunque el porcentaje de humedad fuera incrementando según el sensor comercial. Esto se debe a que los electrodos del sensor de humedad propuesto no tenían aislamiento en la superficie de contacto con el suelo. Esto permitía la creación de un campo eléctrico en toda la longitud de los electrodos, provocando imprecisiones en la información generada. Muestra de ello es lo que se observa en la figura 11 donde es visible la poca variabilidad en los niveles de tensión en las mediciones. Sin embargo, el sensor de humedad comercial mostraba incrementos en lo % de humedad en el tiempo, respondiendo al efecto de agregar agua a la muestra cada 5 minutos.

Esta información permitió identificar los ajustes que se debían hacer en la estructura física del sensor propuesto para corregir imprecisiones en las lecturas.

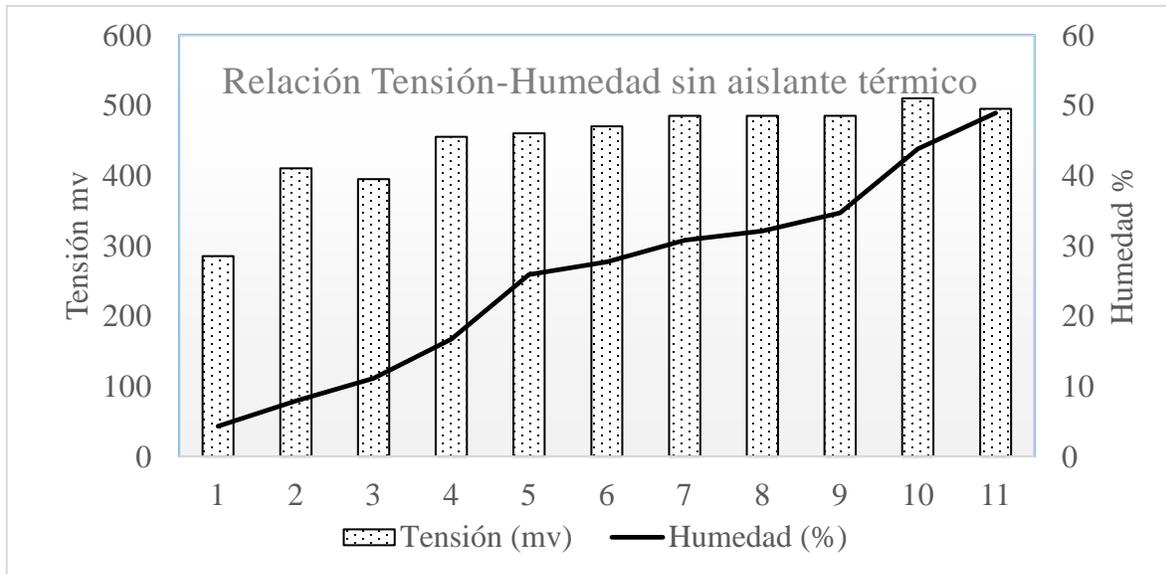


Figura 11. Curva comparativa del sensor de humedad de suelo sin aislante y el sensor de humedad comercial.

Tomando en cuenta las imprecisiones de las lecturas sin aislamiento, se procedió a aislar los electrodos del sensor dejando 3 centímetros sin aislamiento en la parte inferior de los mismos y se hicieron mejoras en el sistema de comunicación (cableado) entre el sensor y el micro controlador.



Figura 12. Pruebas en muestra de suelo seco

Una vez corregido el aislamiento se hicieron las pruebas con muestras de suelo seco obteniendo valores de tensión más precisos; sin embargo, debido a que el suelo presentaba una estructura modificada los rangos entre los valores de tensión eran muy pequeños, aunque la humedad fuera en ascenso (ver figura 12 y 13).

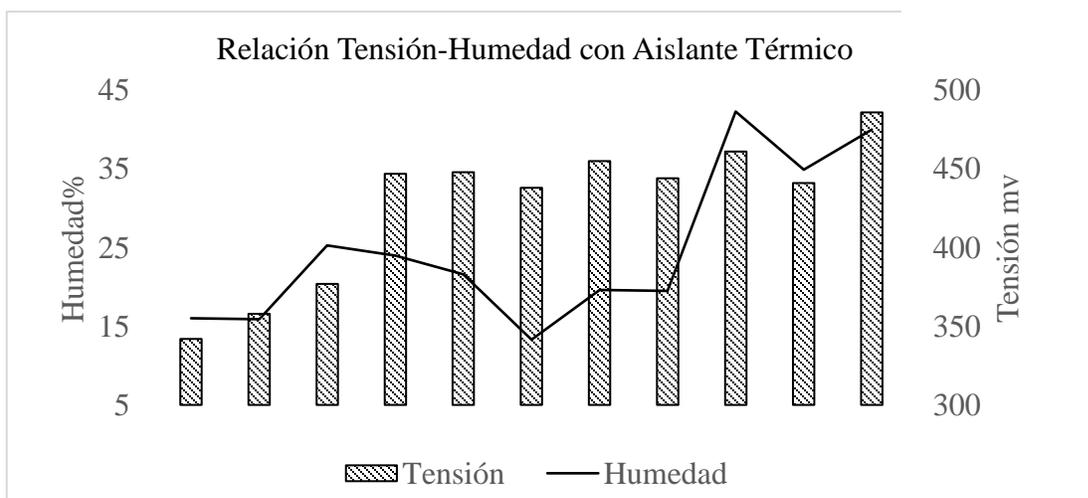


Figura 13. Curva comparativa del sensor de humedad de suelo con aislante y el sensor de humedad comercial.

Con las mejoras en la estructura física del sensor de humedad propuesto se logró validar la curva de calibración con el sensor Moisture Probe Meter mpm-160-b. Como se muestra en la figura 13, en el muestreo que se hizo en la finca Las Mercedes fue posible demostrar que a medida que se incrementaba la humedad del suelo, los niveles de tensión también incrementaban. Esto se debe a las correcciones en el aislamiento de los electrodos y la toma de muestra en suelo en su estado natural.

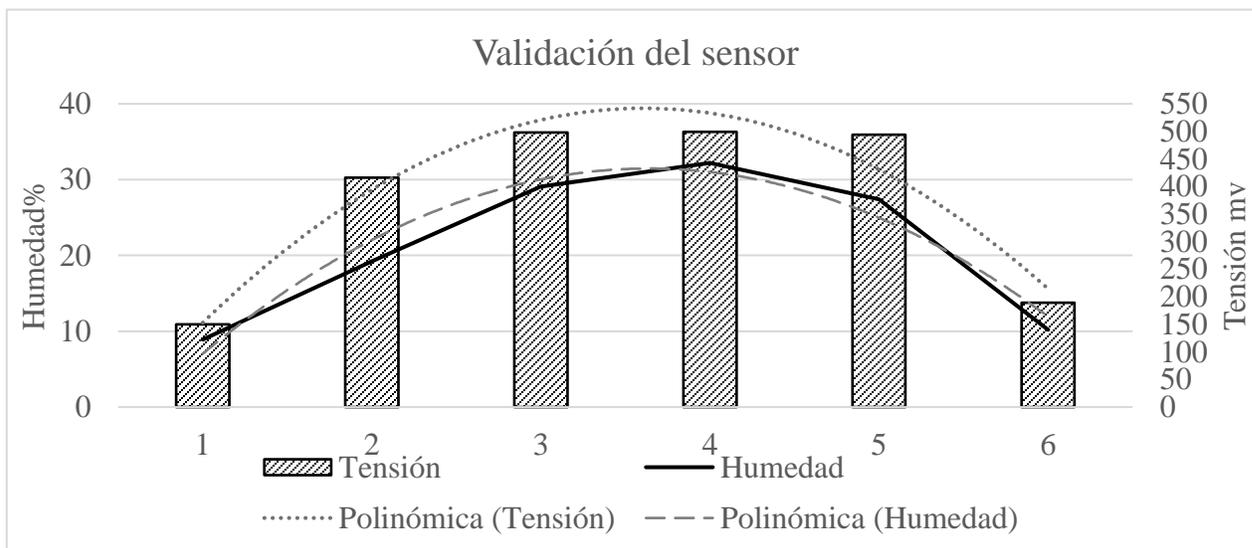


Figura 14. Curva comparativa del sensor de humedad de suelo y el sensor de humedad comercial, en el invernadero de la finca Las Mercedes

El desempeño del sensor de humedad de suelo propuesto permite pasar a la etapa de puesta en marcha de un sistema de automatización y control del riego (ver figura 14), tomando en cuenta que el proceso de calibración del código de programación debe ser alimentado con datos de laboratorio de las propiedades hidrofísicas del suelo para conocer los niveles de tensión según su capacidad de campo (CC) y Limite Productivo (LP). Ver figura 16.



Figura 15. Toma de datos en invernadero

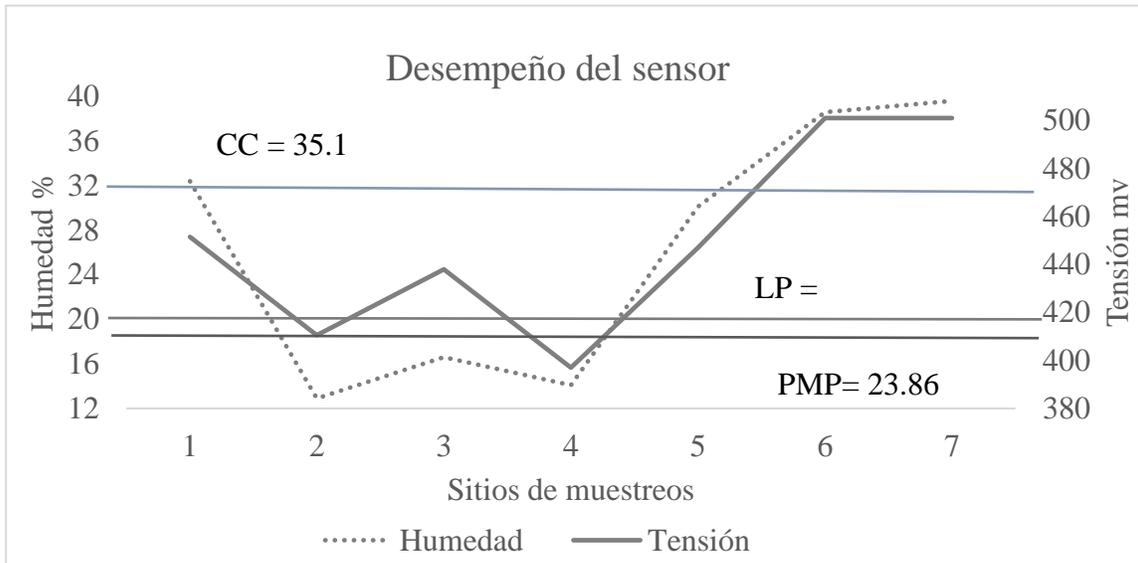


Figura 16. Evaluación del desempeño del sensor de humedad de suelo según las propiedades hidrofísicas del suelo

4.6. Propuesta de sistema de automatización y control de un sistema de riego por goteo

A partir de la información validada del sensor de humedad y el sistema de control se hace una propuesta de automatización y control de un sistema de riego por goteo que integra los siguientes elementos (Figura 16).

El sustento técnico de esta propuesta está basado en una prueba piloto en un invernadero de la finca experimental Las Mercedes. Este sistema se diferencia de los sistemas convencionales en su autonomía en la operación y definición de los momentos del riego ya que no demanda operarios para la apertura o cierre de válvulas y además el momento de riego está definido por información de la humedad del suelo en tiempo real.

4.6.1. Fuente de alimentación energética del sistema

La fuente de alimentación energética es la que proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del micro controlador y la electroválvula; esta fuente está compuesta por los siguientes elementos:

- Panel solar de 30 Watts: Transforma la radiación solar en energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico. Están hechos principalmente por semiconductores (silicio) mono-cristalinos o poli-cristalinos.
- Controlador de carga: Este componente del sistema administra de forma eficiente la energía hacia la batería, prolongando su vida útil al proteger el sistema de sobrecarga y sobre-descargas.
- Batería de 12 voltios: Almacena la energía para poder usarla en momentos de baja o nula radiación solar, su comercialización es basada en la capacidad de almacenar energía y es medida en amperios hora (Ah).

4.6.2. Sistema de automatización y control

El análisis de laboratorio la Capacidad de Campo y el Limite Productivo son necesarios para implementar la automatización y control que permitirá responder las siguientes preguntas.

¿Cuándo Regar? Esta acción se logra cuando el sistema de control identificó que el porcentaje de humedad sea equivalente al Limite Productivo del suelo donde se implementa el sistema, evitando que el nivel de humedad del suelo sea inferior a la demanda de agua de la planta. Esta acción es de suma importancia, ya que, si los niveles de humedad llegan por debajo del valor del Límite Productivo, es posible que la planta pueda sufrir un estrés hídrico. El Limite Productivo puede ser variable para diferentes especies vegetales y tipos de suelos, es el nivel de humedad mínimo para efectuar el riego. (Cisnero Almazan, 2003).

¿Cuándo Dejar de Regar?: Esta acción se logra cuando el sistema de control a través del sensor, identifica que el porcentaje de humedad es equivalente a Capacidad de Campo del suelo donde se implementa el sistema, garantizando de esta manera la optimización del recurso hídrico para la producción. El sistema de control garantiza que el nivel de humedad del suelo se mantenga en un rango donde la planta logre su máximo desarrollo basado en sus necesidades hídricas.

La funcionalidad del sistema de automatización y control depende exclusivamente de la tensión que envía el sensor de humedad. Esta tensión se traduce a porcentajes de humedad utilizando el algoritmo de programación.

Válvula Solenoide Se utiliza una válvula normalmente cerrada la cual es activada o desactivada por el sistema de automatización y control y energizada por la fuente de alimentación.

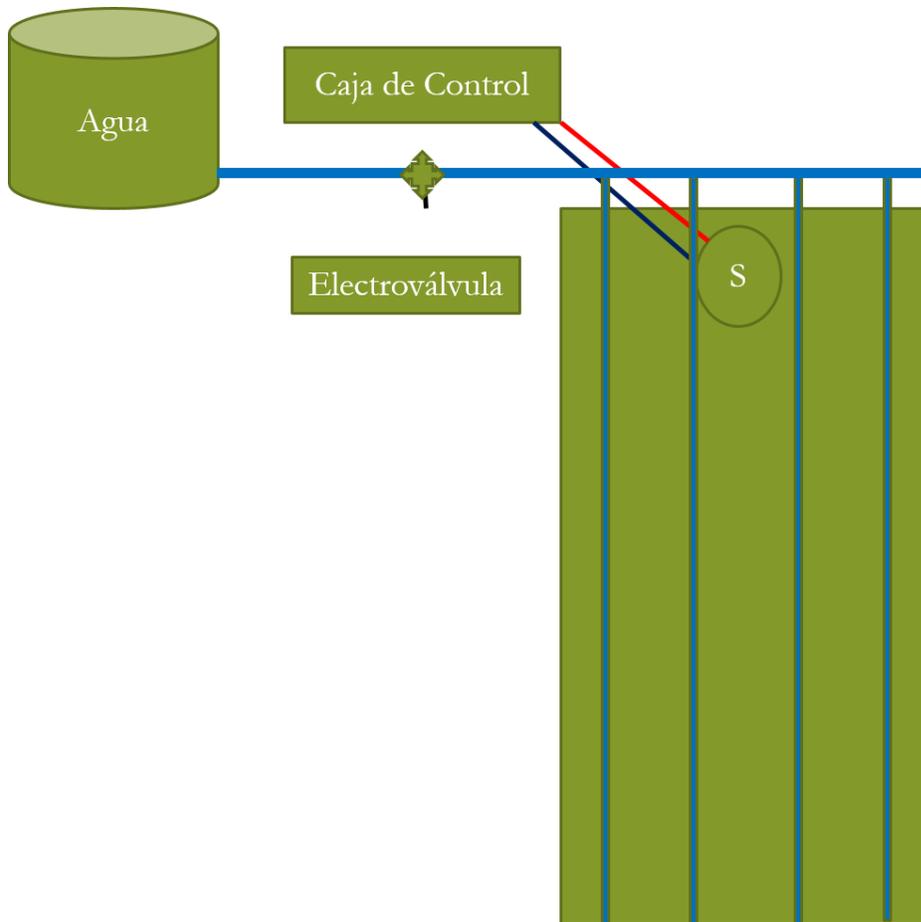


Figura 17. Propuesta de sistema de automatización y control de un sistema de riego por goteo

4.7. Costo del sistema de automatización y control de un sistema de riego.

Se hizo un análisis de costos tomando en cuenta los diferentes elementos que deben acompañar al sensor, para que éste sea útil en un sistema de riego. Como se observa en el cuadro 2, el costo del sensor es de 130 córdobas; Sin embargo, para su puesta en marcha, es necesario contar con un sistema de control, un sistema de operación energética, y un kit de herramientas. El precio del kit fue calculado para construir un total de 500 sensores, tomando en cuenta la vida útil de cada una de las herramientas que componen el kit.

El costo del sistema de automatización y control es de C\$ 19,822.4 o \$568, según los precios del mercado al mes de agosto del año 2020 (ver cuadro 2); sin embargo, es necesario realizar un análisis económico más riguroso para obtener datos con mayor precisión que permitan hacer una estimación real del costo del sistema de automatización y control para el productor.

Costos de los sensores comerciales varían entre los 250 dólares hasta los 625 dólares según el tipo y robustez (precios de la compañía de comercio electrónico Amazon), los cuales requieren ser manipulados manualmente para la toma de lecturas de humedad de suelo, por lo cual no puede ser comparado con este tipo de sensor.

Cuadro 2. Costo del sistema de automatización y control de un sistema de riego

Materiales	Costo en C\$
Caja de control	2470
Sensor	130
Sistema fotovoltaico	5558
Válvula 12 v, DC, 1/4"	4080
Herramientas	10
Sub total	12248
Mano de obra	3000
Sub total	15248
Utilidad	4574,4
Gran total	C\$ 19822,4
Gran Total en dólares	\$ 568

V. CONCLUSIONES

- Se logró diseñar y construir un sensor de humedad de suelo que permite monitorear los niveles de humedad de suelo en tiempo real, y que puede ser utilizado en automatización y control de sistemas de riego por goteo.
- La información que brinda el sensor de humedad de suelo permite la automatización y control del riego por goteo.
- El sistema de automatización y control es una tecnología útil y económica que permite la optimización del recurso hídrico en sistemas de riego por goteo.

VI. RECOMENDACIONES

- Continuar con la validación para mejorar su robustez y aplicabilidad.
- Hacer una validación en cultivos en campo abierto, con el fin de obtener datos de su funcionalidad comparada con otros sistemas de riegos convencionales.
- Antes de instalar el sistema de automatización y control es necesario realizar análisis de laboratorio de las propiedades hidrofísicas del suelo.
- Realizar un análisis económico sobre la rentabilidad del sistema de automatización y control del riego utilizando el sensor de humedad de suelo propuesto.

VII. LITERATURA CITADA

- Cisnero Almazan, R. s.f. *Apuntes de la materia de Riego y Drenaje*. San Luis Potosí, Mexico: Universidad Nacional Autonoma de San Luis Potos. Disponible en:
<http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego%20y%20Drenaje.pdf>
- Edward, M. 2009. *Metodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programacion. College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona*, 7 pp.
- INETER (Instituto Nicargüense de Estudios Territoriales). 2018. *Estación meteorológica Augusto César Sandino*. Managua: Aeropuerto internacional Augusto Cesar Sandino. Obtenido de Augusto Cesar Sandino.
- Koppen. 1993. *climate clasifcattion as a diagnostic tool for general circulation models* . Germany: Meteorologisches Institut der Hamburg, Bundesstrabe.
- M. Enciso, J; Porter, D; Péries, X. 2017. *Uso de sensores de humedad de suelo para eficientizar el riego*. Texas: Texas A&M AgriLife Extension Service.
- Nates, J. 2013. La tecnología punta de la agricultura. *ABC*. Disponible en:
<https://www.abc.es/natural-biodiversidad/20130412/abci-agricultura-tecnologia-punta-201304121101.html>
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2012. *PERSPECTIVAS AMBIENTALES DE LA OCDE*. París, Francia: OCDE.
- Quiminet*. 2012. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/uno-de-los-mejores-cauchos-sinteticos-el-nbr-2854784.htm>
- Sánchez, D. 2015. La FAO teme que la agricultura termine conel agua. Disponible en:
www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/357967-fao-teme-que-agricultura-termine-agua/
- Schugurensk, C; Capraro , F. 2013. *Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivo*. San Juan.
- Sensacultivo*. 2018. Disponible en sensacultivo.es/2018/11/01/4-conceptos-clave-riego-optimo/
- Veloso, C. 2018. *ARDUINO MEGA 2560 CARACTERÍSTICAS*. Disponible en:
<https://www.electrontools.com/Home/WP/2018/06/19/arduino-mega-2560-caracteristicas/>
- Zegarra, E; Chirinos, O. (2016). *Diagnóstico sobre la situación y potencial del sector riego en Nicaragua*. Managua: BID.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Formato para la toma de datos.

No	% humedad Sensor moisture probe meter mpm-160-b	Voltaje Sensor moisture probe meter mpm-160-b (mv)	Lectura mínima Sensor casero (mv)	Lectura máxima Sensor Casero. (mv)

Anexo 2. Sensor de humedad de suelo comercial.



Anexo 3. Validación del sensor de humedad de suelo en invernadero

