

Calibración de Sensor de Humedad Tipo Capacitivo, Método Gravimétrico

Oscar F. Lopez Albino
Tunja Boyacá, Colombia
Email: oscar.lopeza@usantoto.edu.co

Abstract—The present research seeks to achieve through the development of the gravimetric method the calibration of a low-cost soil moisture sensor such as SKU: SEN0193 through the use of soil samples from real crops in the department of Boyacá Colombia, with which are made the experimental processes to establish the gravimetric relationship of the saturation of soil samples based on digital data taken by the sensor, which allow to find the mathematical trend function of the behavior of soil moisture, for the implementation in crops of the region through wireless sensor networks

Keywords: sensor calibration, soil moisture, capacitive sensor, Gravimetric analysis, Analog Digital Converter (ADC)

I. INTRODUCCIÓN

La aplicación de sistemas de internet de las cosas para el control hídrico en la agricultura toma importancia, considerando la necesidad que surge por el cuidado y el control de este recurso y conociendo la necesidad de consumo que se tiene de este, ya que el 70 % del agua dulce que se utiliza en el planeta es para uso agrícola [1][2], por lo que requiere un control eficiente con dispositivos asequibles que permitan adaptar a los diferentes sistemas de monitoreo para que tengan un costo mas bajo, un uso amigable, que respondan a la necesidad y que tengan los parámetros necesarios para la garantizar su utilidad.

El rápido desarrollo tecnológico y el uso de la agricultura de precisión como medio para potenciar la producción de los cultivos en general[3], plantea el hecho de incorporar las nuevas tecnologías en técnicas como el IoT, parte eficiente para el monitoreo, control y verificación de variables físicas en entornos reales. En ese conjunto, un estudio como el de la humedad del suelo, es importante en muchas disciplinas como estas, y depende ampliamente de los dispositivos con los que se analiza. Para este fin, en este artículo se relaciona un método de calibración para la caracterización del sensor Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3) de DFROBOT, cuya compatibilidad con sistemas microcontroladores [4] hacen de este dispositivo una alternativa en implementación para sistemas de redes de sensores y otras aplicaciones en IoT.

Así mismo, con este concepto se busca brindar una herramienta que permita establecer una metodología para la calibración de sensores de humedad de bajo costo, cuyas referencias carecen de una hoja técnica, que especifique sus características de operación y por ende la fiabilidad de los datos que entregan estos sensores. Mediante una revisión bibliográfica de diversos investigadores acerca de técnicas más comunes para la calibración de higrómetros, se especificaron

algunas de las más usadas, métodos de fluido dividido, de dos presiones, soluciones sal agua [5]; además se revisaron métodos propios para calibración de sensores tipo capacitivo, con propuestas aplicadas a sensores con el mismo principio de medida, dando especificaciones para calibración termogravimétrica a sensores SKU: SEN0193 [6].

II. MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

Para la medición de humedad del suelo se utilizan diferentes principios de funcionamiento directos e indirectos, que sin importar los dispositivos usados dependen de la cantidad de agua en el suelo y sus variaciones [7], pues la distribución del liquido en la meseta vegetal va directamente ligada al tipo de suelo y su interacción con la vegetación y la atmósfera. La

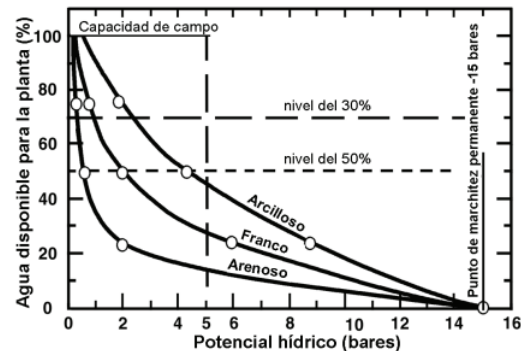


Fig. 1: Eficiencias estimadas para períodos temporales promedio y períodos de uso máximo de agua. [8]

vegetación en el suelo constituye un papel importante en la definición de la humedad debido a la modificación del balance hidrológico que causan las plantas, pues influye su capacidad de absorción de agua del suelo cercano y su transferencia a la atmósfera[7]. En relación a la figura 1, se tiene en cuenta que el comportamiento del suelo cuando esta totalmente húmedo o saturado corresponde a su capacidad de campo (CC), lo que dispone de una tensión de suelo baja de 0.1 bares [8], esa tensión, es el medio que determina la fuerza con la que se retienen las moléculas de agua en el suelo, en un terreno húmedo cerca de la capacidad de campo la tensión de retención de humedad es débil por lo que es mas fácil de extraer o evaporar, sin embargo para las plantas a medida que la retención de humedad aumenta y el agua disponible para la planta baja, la tensión de las partículas de suelo aumenta,

haciendo mas difícil la extracción de liquido, hasta llegar a un máximo de tensión que se conoce como punto de marchitez (PMP) donde la humedad del suelo es baja y la vegetación muere. En esa tendencia existen diferentes dispositivos de uso comercial que miden la humedad del suelo considerando estos parámetros, los principales son los sensores tensiómetros, resistivos, de medida de constante dieléctrica, dentro de los que se incluyen los capacitivos y por TDR (uso de laser) y la sonda de neutrones [9]. Cada uno de los métodos de medida tiene sus características propias: la sonda de neutrones estima la humedad del suelo a partir de la emisión radioactiva de neutrones que chocan contra las moléculas de hidrógeno haciendo que se ralenticen haciendo que el detector de la sonda estime la medida. Los sensores tipo resistivos, tienen su principio de medición basado en la resistencia eléctrica que varia con la humedad, sin embargo se ven afectados por la temperatura y son mas eficientes para entornos de medición de humedad alta [10]. Los tensiómetros estiman la humedad del suelo a partir de la variación de la tensión ocasionada por el potencial hídrico, sin embargo tienden a tener un alto grado de error en suelos secos, debido a las altas tensiones del suelo [8] y por ultimo los sensores capacitivos que actúan midiendo la constante dieléctrica del suelo, que cambia a partir que se humedece el terreno, generando capacitancias a partir de frecuencia.

A. Sensor Capacitivo de humedad de suelo

La capacitancia, en su definición es la cantidad de carga que un material puede almacenar bajo determinada característica de potenciales eléctricos [11], bajo esa relación la ecuación que describe la capacitancia depende de la carga y el potencial eléctrico.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Dentro de ese concepto, la capacitancia se estudia a partir de condensadores, que se definen como configuraciones de placas paralelas, separadas por un material dieléctrico. Cuando el dispositivo se energiza, almacena cierta cantidad de energía o carga eléctrica a partir de la generación de un campo eléctrico; en esos términos la capacitancia C se determina mediante la ecuación:

$$C = \epsilon_0 k \frac{A}{d} \quad (2)$$

Donde ϵ_0 es la constante de permitividad electrostática del ambiente, k es la constante dieléctrica del ambiente, A es el área metálica de las superficies y d es la distancia entre las superficies metálicas.

La capacitancia como principio de medición para sensores, se vale de los cambios que se obtengan de la constante dieléctrica k , la cual varia en función de la humedad presente en el suelo, en relación con la superficie de las placas. Estos dispositivos, usan un circuito oscilador de AC, que al insertarse por medio de la sonda del sensor, genera diferentes valores de frecuencia dependiendo la humedad del suelo, lo que ocasiona un cambio de voltaje [8]. Cabe mencionar que los sensores tipo capacitivos tienen rangos de medida pequeños y son

particularmente sensibles a ciertas condiciones de temperatura, sin embargo son dispositivos comúnmente utilizados.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La arquitectura propuesta para la calibración de sensor se basa en la el método gravimétrico, por el que se hace la caracterización por medio de un registro de datos de la gravimetría del sensor al someterlo a análisis por medio de la muestra de terreno del cultivo que se busca estudiar. El sensor analizado es el *Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3)* de DFROBOT, un sensor de humedad tipo capacitivo, de bajo costo compatible con Arduino. El cual, posee una salida de datos análoga, por lo que para su lectura se necesita un conversor ADC, también es compatible con Raspberry PI y plataformas de la familia DFROBOT. En comparación con otros sensores de humedad de este tipo, se hace factible su uso debido a su precisión ya que no tiene un driver externo, pues viene incorporado dentro de la sonda, lo que facilita su transporte y uso en campo. Este sensor es una versión mas actualizada del SKU:SEN0193, por lo que tiene algunas características diferentes, no obstante los parámetros de funcionamiento son iguales, de lo especificado por el fabricante es un sensor con un voltaje de funcionamiento en un rango de 3.3 a 5.5 VDC, la salida de voltaje comprende un rango de 0-3.3 VDC, y un consumo de corriente de operación de 5 mA [12]. Sus dimensiones son de 9.80 cm de largo por 2.3 cm de ancho, con un recubrimiento metálico para la sonda y una cubierta plástica de protección para el circuito, incorporado para esta versión.

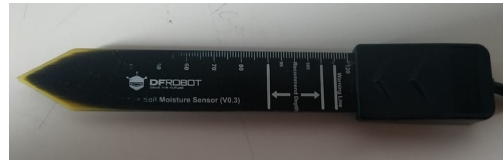


Fig. 2: Sensor utilizado para el experimento, *Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3)*

Para la calibración de este sensor, se tienen en cuenta algunas de las recomendaciones hechas por diferentes autores [13][1][7], para los sensores de humedad Capacitivos, donde se propone una metodología de calibración basado en pruebas experimentales haciendo uso de técnicas termogravimétricas y gravimétricas. En ese orden de ideas, como procedimiento inicial se enumeran los materiales utilizados para el experimento:

- Sensor de Humedad (Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3))
- Arduino (Con pin de Lectura análoga)
- Probeta Graduada de 25 mL
- Gotero de Agua destilada
- Balanza de precisión
- Vaso de precipitado
- Cronómetro

NOTA: Se describen en la lista anterior los principales elementos utilizados para la calibración de este sensor, no

obstante, en las pruebas particulares se pueden usar otros elementos necesarios para mejorar la precisión del proceso.

La propuesta de calibración se especifica en la siguiente figura:

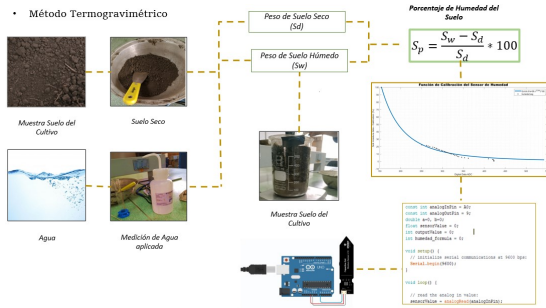


Fig. 3: Metodología de Calibración Propuesta

A. Hardware asociado

Para la toma de datos por parte del sensor, se usa la salida a analógica del dispositivo mediante la cual se toma la lectura en el conversor analógico digital (ADC) de cualquier microcontrolador, en este caso se usó Arduino, debido a que tiene una plataforma propia que permite una visualización de datos más rápida.

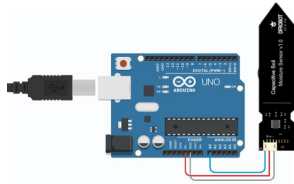


Fig. 4: Circuito para el Sensor

Atendiendo a las especificaciones del fabricante, el sensor se conecta a la salida de 5V del Arduino y a un puerto analógico del mismo, a partir del cual se genera la conversión de voltajes que serán transmitidos en valor digital por comunicación serial y visualizados en el monitor de la plataforma, para tomar registro de los mismos, con intervalos de 2 mS como retardo de cada dato consecutivo. Cuyo algoritmo se muestra a continuación.

```
1  ## Lectura analoga de un sensor
2  const int analogInPin = A0;
3  int sensorValue = 0;
4  int outputValue = 0;
5
6  void setup() {
7    // initialize serial communications at 9600
8    // bps:
9    Serial.begin(9600);
10 }
11 void loop() {
12   sensorValue = analogRead(analogInPin);
13   // print the results to the Serial Monitor:
14   Serial.print("sensor = ");
15   Serial.println(sensorValue);
16   delay(2);
```

B. Procedimiento Experimental

Para el procedimiento experimental, se siguen las fases y pasos propuestas en la figura 3, sobre los cuales se hacen dos tipos de pruebas con características diferentes en la muestra del cultivo, una con un proceso de tamizado a 2mm y otra sin tamizado con un suelo más heterogéneo, con esas pruebas se extraen los datos necesarios y se calcula la ecuación correspondiente asociada para el sensor.

En la caracterización del sensor, se analizan las especificaciones técnicas del equipo dadas por el fabricante; donde como primer parte, se identifica el intervalo de profundidad recomendado, de tal forma, que no se afecte la funcionalidad ni la precisión de las medidas, como se relaciona en la figura 5. Esto permite definir una zona de trabajo previa, que da el

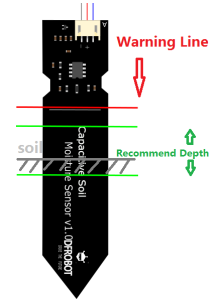


Fig. 5: Rango de calibración

ajuste de altura a la que debe ser enterrada la sonda en la muestra. Por otro lado, para las pruebas de la metodología de calibración, se hacen dos experimentos separados. Inicialmente el terreno pasa por un proceso de secado al aire libre, por un periodo de 7 días, o por un horno de secado, para extraer toda la humedad presente.

1) *Toma de Datos Para Un Suelo Homogéneo:* Con el fin de analizar las características de absorción de la tierra, se toma la muestra y se muele de tal forma que se cree un suelo más homogéneo, donde tomar los datos necesarios. La muestra de tierra se tritura, para eliminar gran parte de los terrones originales, y luego haciendo un proceso de tamizado, se garantiza que todos los granos de tierra tengan un tamaño máximo de 2 mm como se muestra en la figura.



Fig. 6: Muestra de tierra tamizada

Se pone la muestra en el vaso de precipitado o en un recipiente que tenga suficiente altura, considerando el tamaño del sensor (10 cm) y la cantidad de tierra utilizada. Antes

de esto, se debe tomar un registro con ayuda de la balanza, del peso del vaso y del peso de la tierra seca con el sensor, considerando este peso como partida para el procedimiento. En la toma de datos, de forma previa, se descuenta el peso del vaso de precipitado, dando esto como dato inicial 680.3 gr, que va corresponder en este experimento, como el dato de la tierra seca.

Durante el tiempo que dura la prueba, el método Gravimétrico consiste en tomar datos de peso de la muestra, a medida que se agrega una cantidad de agua cada cierto tiempo, y la vez ir registrando el valor obtenido del sensor. Las muestras registradas, deben separarse una de la otra por un estimado de tiempo suficiente, para que la tierra pueda absorber el líquido y el sensor vaya detectado estos cambios. Para cumplir ese objetivo, el parámetro de profundidad se ajusta según lo recomienda el fabricante, y se ha cubierto la parte superior de la sonda, antes de poner la cantidad de tierra adecuada, para estar dentro del límite recomendado, figura 5. Enseguida, con ayuda de una probeta y un gotero, se miden 5 mL de agua, que se irán aplicado en intervalos de tiempo de 30 segundos, donde se tomarán los registros de variaciones de peso, los datos análogos del sensor y la cantidad de agua suministrada a la muestra.

Estos datos se registran manualmente y serán los que van a servir para hallar la relación de cambio de humedad de la muestra, con respecto a valor análogo entregado por el sensor, cuya variación comprende un rango de 0 a 1023. En este sentido, con la hipótesis planteada, para generar la gráfica se debe hallar inicialmente, una relación de proporcionalidad entre el peso del suelo seco y el cambio que sucede al añadir las cantidades de agua, para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_p = \frac{S_w - S_d}{S_d} * 100 \quad (3)$$

Donde S_p corresponde al porcentaje de humedad del suelo, S_w es el peso del suelo húmedo y S_d es el peso del suelo seco[1]. Con la aplicación de la ecuación 3, a cada uno de los datos, se halla el cambio o error porcentual que experimenta la muestra a lo largo de todo el proceso. Esos nuevos resultados, corresponden al eje Y de la gráfica, y representan la variación del porcentaje de humedad del suelo, en función de la información obtenida del conversor ADC del sensor.

2) *Toma de Datos Para Un Suelo Heterogéneo:* Referenciando la figura 3, se hace una nueva prueba, en este caso se toma una muestra húmeda de terreno y se pasa por un horno de secado, en el cual, se elimina todo rastro de humedad dejando la tierra preparada para el experimento. A comparación de tipo de suelo anterior, esta vez no se hace el proceso de tamizaje con el fin de trabajar con el terreno mas heterogéneo de tal forma que solo se quitan las partes mas grandes haciendo que el terreno sea menos compacto.

Bajo esas características, y continuado con el proceso descrito en la experiencia anterior, de nuevo se cubre la parte



Fig. 7: Muestra de tierra sin tamizar, segunda prueba

superior del sensor a fin de mantener el intervalo de medida recomendado por el fabricante, y se introduce en la muestra de tierra, donde se toman de nuevo los datos necesarios. En esta prueba, las mismas cantidades de agua en igual intervalo de tiempo, tomando un registro del cambio del peso de la muestra a medida que se satura y del valor analógico convertido, que entrega el sensor por pantalla.

Para esta ocasión, dado que la tierra no tuvo ningún otro acondicionamiento aparte del secado, se busca una saturación mas uniforme que no presente problemas de absorción sino hasta que la muestra se sature en su totalidad. En este caso, los datos iniciales fueron un peso del vaso de precipitado de 176.5 gr, un peso de la tierra sin el sensor de 580 g, que completo es de 615.8 g, como peso de partida, quitando el peso de recipiente. Posteriormente, se realiza la toma de los datos necesarios, y aplicando la ecuación 3, se obtiene la relación lineal del cambio de humedad en la muestra. Con el fin de comparar ambos procedimientos y determinar cual es mas eficiente.

IV. RESULTADOS

Como resultados iniciales se presenta la curva de saturación de las muestras de terreno utilizadas evidenciando por medio de esta, la correcta saturación de la tierra hasta llegar a ser constante, que es cuando se logra la capacidad de campo (CC). Esta gráfica se obtiene a partir de la toma de datos digitales del sensor alrededor de 75000 puntos. La forma de la gráfica es inversa dada el comportamiento inversamente proporcional del sensor, figura 11.

Concluyendo por otra parte la explicación detallada de la parte experimental de esta prueba, se pasan a analizar los resultados obtenidos con los datos recolectados. Continuando con el proceso metodológico planteado en la figura 3, y tomando como referencia los pesos de la muestra y valor digital del sensor, se obtiene la representación gráfica, del comportamiento del porcentaje de humedad en los dos tipos de pruebas.

Con los datos de la figura 9, en Matlab se importan los valores calculados correspondientes y se halla la mejor función de tendencia con su gráfico de error en comparación con la muestra. Como parámetros para la elección del tipo, forma y grado de la ecuación buscada, se priorizo la eficiencia de la misma, en relación a los datos del experimento, y los puntos límites donde los datos del sensor estimaban los

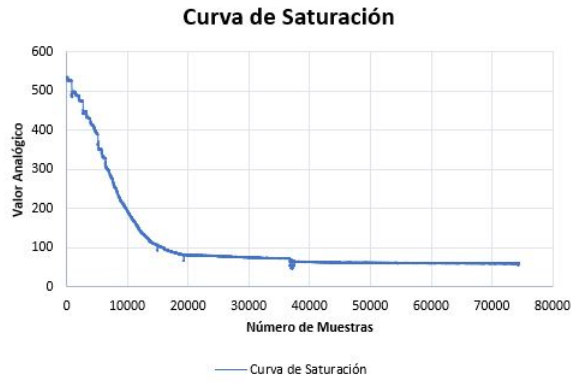


Fig. 8: Curva de saturación de la muestra de tierra

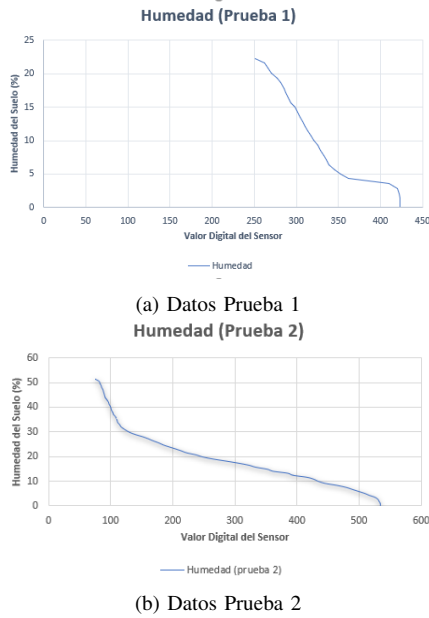


Fig. 9: Datos Obtenidos para calibración

valores mínimos y máximos, además de eso, se busco una representación de tendencia con una ecuación simple, que fuera fácilmente adaptable a procesos individuales donde la capacidad de procesamiento sea baja y se necesite maximizar eficiencia.

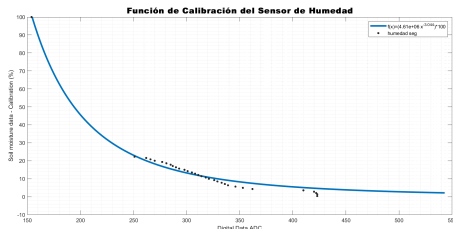


Fig. 10: Curva de tendencia Obtenida

De lo obtenido a partir de los datos, se optado por una línea de tendencia tipo potencial, ya que presenta una buena

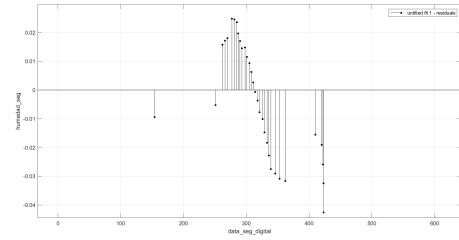


Fig. 11: Gráfico de error residual en la Muestra

similitud al compararla con la distribución, además de que se adapta de forma mas precisa que los demás tipos de línea de tendencia. La ecuación resultante es la siguiente:

$$S_p = 4610000 * X^{-3.044} \quad (4)$$

la ecuación 4, representa el resultado final del proceso del calibración. pues con esta, ya es posible tener una aproximación mas concreta del comportamiento de medición del sensor, que fue la razón por la que se tomaron inicialmente los datos analógicos que posteriormente se caracterizaron en relación con la variación de los mismos, con respecto al cambio de peso a causa de la humedad en la muestra de tierra evaluada. Partiendo de una aproximación del 98% a los datos recolectados en laboratorio, esta ecuación se ha acercado a resultados logrados por otros investigadores[13]. Cabe mencionar, que aunque se hicieron pruebas con la muestra de tierra del cultivo analizado para el diseño en general, la calibración es óptima, no obstante, pueden haber cambios en tipos de terrenos distintos; por lo que para mejorar en precisión, desde la bibliografía se pueden buscar nuevas referencias para la caracterización de sensores, si se busca incluir mas variables al análisis.

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

De los resultados logrados, la caracterización del sensor a utilizar dentro del parámetro de medición de humedad, es importante para dar soporte a la función matemática que se asigne respaldada en pruebas, por esta razón desde la investigación en la bibliografía, se adopto el método gravimétrico que se uso para calibrar el sensor. De cuyos procesos, se mencionan algunos resultados.

Por un lado, en las pruebas experimentales es posible identificar una relación casi lineal entre el cambio de peso que se experimente con el suministro de agua y cantidad en mililitros agregados, dado que el agua tiene una densidad a condiciones de temperatura promedio, de aproximadamente 1; por tal razón, al agregar 5 mL el cambio de peso debe ser alrededor de 5 gr.

También, es claro que a mayor cantidad de datos tomados, se mejora la precisión de la ecuación que se obtenga de estos. Sin embargo, esto se ve limitado por la capacidad de absorción que tenga la tierra, pues aunque se agreguen cantidades de agua pequeñas a intervalos de tiempo considerables, las condiciones de la tierra pueden afectar negativamente con una

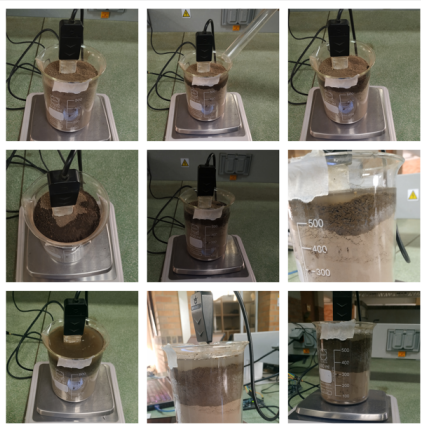


Fig. 12: Collage de saturación progresiva de muestra del terreno

absorción lenta, que causa apozamiento en la parte superior del recipiente utilizado.

Como se observa en la figura 12, a medida que se agregaron los mililitros correspondientes a la muestra, el líquido debe ir filtrándose como se puede evidenciar, sin embargo, para esta prueba con un terreno homogéneo, se han observado algunos inconvenientes referentes al número de muestras que se han logrado obtener. Como ya se ha mencionado, esto depende de la capacidad de absorción, además, este caso se presenta porque buscando esta mayor homogeneización en el terreno, se ha conseguido una estructura compacta, lo que ha causado un apozamiento temprano, debido a que no hay espacios por donde pueda filtrar el agua, haciendo que el proceso sea sumamente lento, a comparación de los 30 segundos con los que se han agregado las cantidades. Algo semejante ocurre, al agregar cantidades de agua muy grandes en periodos de tiempo muy cortos, por lo cual, es importante que para mejorar la calidad del procedimiento se analice detalladamente las condiciones previas a tomar los datos. En la segunda prueba realizada se han obtenido mayor cantidad de puntos que en la prueba con tierra homogénea. Esto debido a que la tierra está menos compacta y la absorción del agua es más rápida, en ese orden de ideas, teniendo en consideración las variaciones hechas a la muestra se han extraído los valores correspondientes de valor digital y datos de peso, no obstante aunque en esta ocasión las mediciones fueron más extensas, los resultados que se obtuvieron no tuvieron mayor variación dando ecuaciones de comportamiento menos eficiente y más complejas que al llevarse al proceso de cálculo dentro del controlador pueden ocasionar problemas de eficiencia.

Como características en particular, al lograrse una absorción del líquido adecuada la adición de agua a la muestra se hizo durante media hora, agregando un total de 300 mL sobre la muestra inicial. Además de eso, también a modo experimental se aprovecho el proceso, para observar la curva de saturación del suelo analizado, observando su cambio a través del tiempo hasta que se logro una saturación en toda el área. Ambas pruebas se realizaron a condiciones de temperatura comunes

entre 15-20 °C, así poder establecer un comportamiento estimado, de la variación de la humedad con el tiempo más óptimo sin afectaciones por temperatura.

VI. CONCLUSIONES

Se propuso mediante la investigación, una metodología basada en el método gravimétrico, para la calibración de sensores de humedad en especial el *Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3)*, la cual, funciona con buenos resultados, obteniendo una asertividad sobre los datos medidos de arriba de un 98 %, que al compararse con artículos de investigación, se asemeja de buena forma con las ecuaciones obtenidas de sensores similares que se basan en el mismo principio de funcionamiento, lo que deja a esta metodología como posible opción a tener en cuenta para la calibración de estos sensores para otros proyectos. No obstante cabe mencionar que solo se desarrollo la calibración en un tipo de terreno, por lo que para mejorar precisión se debe repetir con otras características de suelos y observar cambios.

Para la extracción de muestras experimentales, se logro un resultado más favorable con el uso de una muestra de terreno homogéneo, sin embargo, en la experimentación el suelo homogéneo presenta menor capacidad de absorción al ser más compacto y su saturación es más lenta, por lo que se requieren varias pruebas.

Mediante la investigación hecha para este sensor tipo capacitivo se ha mostrado que un sensor de bajo costo puede medir eficazmente la humedad del suelo, teniendo en cuenta los parámetros básicos que proporciona el fabricante y el proceso de calibración, no obstante, como análisis particular, se resalta que este sensor tiende a tener alteraciones en su medida al utilizarse en suelos muy compactos, debido a la tensión, que experimenta la sonda.

REFERENCES

- [1] G. Souza, B. T. De Faria, R. G. Alves, F. Lima, P. T. Aquino, and J.-P. Soininen, "Calibration equation and field test of a capacitive soil moisture sensor," in *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*. IEEE, 2020, pp. 180–184.
- [2] R. Salazar-Moreno, A. Rojano-Aguilar, and I. L. López-Cruz, "La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada," *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 5, no. 2, pp. 177–183, 2014.
- [3] E. A. Q. Montoya, S. F. J. Colorado, W. Y. C. Muñoz, and G. E. C. Golondrino, "Propuesta de una arquitectura para agricultura de precisión soportada en iot," *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, no. 24, pp. 39–56, 2017.
- [4] "Calibración de laboratorio y evaluación del desempeño de sensores de humedad del suelo resistivos y capacitivos de bajo costo y de muy bajo costo," *Sensores*.
- [5] J. A. D. Pacheco and E. M. López, "Validación del método de calibración de higrómetros capacitivos con soluciones sal-agua como generadoras de humedad," *Cent. Nac. Metrol. Publicaciones Técnicas*, 2007.
- [6] E. A. D. Nagahage, I. S. P. Nagahage, and T. Fujino, "Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system," *Agriculture*, vol. 9, no. 7, p. 141, 2019.
- [7] P. Placidi, L. Gasperini, A. Grassi, M. Cecconi, and A. Scorzoni, "Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for iot networks," *Sensors*, vol. 20, no. 12, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3585>
- [8] E. C. Martín and C. Muñoz, "Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego, cuándo?" 2017.

- [9] C. Schugurensky and F. Capraro, "Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. aplicaciones en vid y olivo," in *Proceedings of the XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA)*, Santiago, Chile, 2008, pp. 10–12.
- [10] L. Carrillo and A. Antonio, "Desempeño de un sensor de humedad en un suelo con vegetación," 2014.
- [11] J. Hrisko, "Capacitive soil moisture sensor theory, calibration, and testing," 07 2020.
- [12] D. Distributor. Sku: Sen0193. DFROBOT drive the future. [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- [13] Radi, Murtiningrum, Ngadisih, F. S. Muzdrikah, M. S. Nuha, and F. A. Rizqi, "Calibration of capacitive soil moisture sensor (sku:sen0193)," in *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, 2018, pp. 1–6.
- [14] S. K. Sahit, M. H. Razali, and S. Mustaffha, "Effectiveness smart sensor devices for sustainable irrigation in agriculture," in *2020 10th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, 2020, pp. 11–14.
- [15] J. Whitcomb, D. Clewley, R. Akbar, A. Silva, A. Berg, J. Adams, and M. Moghaddam, "Method for upscaling in-situ soil moisture measurements for calibration and validation of snap soil moisture products," in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016, pp. 1641–1644.
- [16] J. Pichlmaier, H. Pollak, and A. Walter, "New calibration techniques for real time characterization of gas sensors," in *TRANSDUCERS '91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers*, 1991, pp. 464–466.
- [17] —, "New calibration techniques for real time characterization of gas sensors," in *TRANSDUCERS'91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers.* IEEE, 1991, pp. 464–466.
- [18] P. Placidi, R. Morbidelli, D. Fortunati, N. Papini, F. Gobbi, and A. Scorzoni, "Monitoring soil and ambient parameters in the iot precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors," *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 5110, 2021.
- [19] C. Jamroen, P. Komkum, C. Fongkerd, and W. Krongpha, "An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 172 756–172 769, 2020.
- [20] K.-D. Kinzli, N. Manana, and R. Oad, "Comparison of laboratory and field calibration of a soil-moisture capacitance probe for various soils," *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 138, no. 4, pp. 310–321, 2012.
- [21] O. Dietrich and J. Steidl, "Field calibrations of a diviner 2000 capacitive soil water content probe on a shallow groundwater site and the application in a weighable groundwater lysimeter," *Agricultural Water Management*, vol. 252, p. 106874, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377421001396>
- [22] T. L. Rowlandson, A. A. Berg, P. R. Bullock, E. R. Ojo, H. McNairn, G. Wiseman, and M. H. Cosh, "Evaluation of several calibration procedures for a portable soil moisture sensor," *Journal of Hydrology*, vol. 498, pp. 335–344, 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413003880>