

Sensores electrónicos en la agricultura de precisión

Electronic sensors used in precision agriculture

Caicedo-Rosero, L. C.¹ , Lara-Hernández G.¹ , Morales-Almanza, K.¹ , Flores-Cuautle, J. J. A.² *
(*jflores_cuautle@hotmail.com)

Recibido: 11 de octubre de 2023 Aceptado: 5 de enero de 2024

RESUMEN

El crecimiento demográfico ha provocado un aumento de la demanda de productos agrícolas, lo que se traduce en una enorme presión para aumentar el rendimiento de las tierras agrícolas y el consiguiente desarrollo de nuevos métodos para satisfacer esta demanda. Entre los métodos que han surgido se encuentra la Agricultura de Precisión (AP), que aumenta la producción conociendo y monitorizando constantemente el estado del suelo, especialmente los nutrientes y la humedad, para responder inmediatamente a sus necesidades. La AP se basa en el seguimiento de variables como el tipo de producción, la topografía y el tipo de suelo. En cuanto al tipo de suelo, es necesario cuantificar la fertilidad del suelo, los minerales presentes y las característi-

cas físicas del suelo, que están relacionadas con la cantidad variable de nutrientes presentes, el pH y la humedad, que son importantes para el correcto desarrollo del cultivo. Los sensores permiten la cuantificación de estas variables, facilitan su análisis y su aplicación a la AP. Este trabajo presenta una recopilación de sensores de humedad, conductividad eléctrica y pH, así como las redes de sensores más comunes en AP, su principio de funcionamiento y ejemplos de estos sensores existentes en el mercado.

Palabras clave: *Monitoreo de suelos, humedad de suelos, conductividad eléctrica, pH, redes de sensores*

ABSTRACT

Population growth has led to increased demand for agricultural products, resulting in enormous pressure

to increase yields from agricultural land and the consequent development of new methods to meet

¹Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba, Veracruz, México C.P. 94300

²CONAHCYT/Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba, Veracruz, México C.P. 94300



this demand. Among the methods that have emerged is Precision Agriculture (PA), which increases production by constantly knowing and monitoring the state of the soil, particularly nutrients and moisture, to respond immediately to its needs. PA is based on monitoring variables such as the type of production, topography, and soil type. About the type of soil, it is necessary to quantify the fertility of the soil, the minerals present, and the physical characteristics of the soil, which are linked to the variable amount of nutrients present, pH, and humidity,

which are essential for the correct development of the crop. The sensors allow the quantification of these variables, facilitating their analysis and application to PA. This work presents a compilation of humidity, electrical conductivity, and pH sensors, as well as the most common sensor networks in PA, their operating principle, and examples of these existing sensors on the market.

Keywords: *Soil monitoring, soil humidity, electrical conductivity, pH, network sensors*

INTRODUCCIÓN

La agricultura del siglo XXI afronta múltiples retos, tales como, incrementar la producción de alimentos para la creciente población mundial, reducir la fuerza de trabajo rural, producir una mayor cantidad de materias primas para el mercado bioenergético, contribuir al desarrollo general de los países que dependen de la agricultura y adoptar métodos de producción más eficientes y sostenibles [1].

La agenda 2020 para el desarrollo sostenible establece a la alimentación y la agricultura como factores claves en el desarrollo sustentable. En este sentido, la buena gestión de los sistemas naturales es una herramienta útil para disminuir la pobreza y el hambre. Por lo anterior, un uso eficiente de los recursos naturales permitiría alcanzar el desarrollo sostenible [2].

Como parte de la gestión de los sistemas naturales y la agricultura, en la década de los 70 dio inicio la automatización de la agricultura mediante el uso de máquinas agrícolas, para fines de los 80 y comienzos de los 90 fue posible el desarrollo de equipos inteligentes para el manejo localizado de las prácticas agrícolas gracias al Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [3], lo que trajo consigo una mayor eficiencia de aplicación de insumos dándose así el surgimiento de la agricultura de precisión.

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

El programa cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur menciona que "la agricultura de precisión (AP), incorpora técnicas para optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola" [3]. De esta definición se desprende que la principal diferencia entre los sistemas agrícolas tradicionales y la agricultura de precisión es el tomar en cuenta la variabilidad espacial del suelo, ya que la agricultura tradicional considera al suelo de forma homogénea.

La variabilidad espacial se relaciona con la variación del contenido de nutrientes en un mismo terreno. Esta variación puede ser de, humedad, contenido de materia orgánica, macro y micronutrientes, haciendo que el crecimiento de las plantas sea diferente de acuerdo con el lugar específico donde estas son cultivadas. Como un ejemplo de las diferencias de nutrientes que se pueden encontrar, la Figura 1 muestra la variabilidad espacial de carbono en una superficie de 2500 m² a 40 cm de profundidad en el suelo, en este muestreo, el porcentaje de carbono varía entre 2 y 15 %. Para la elaboración de esta gráfica, se muestreó un área del departamento de Saboya, Colombia.

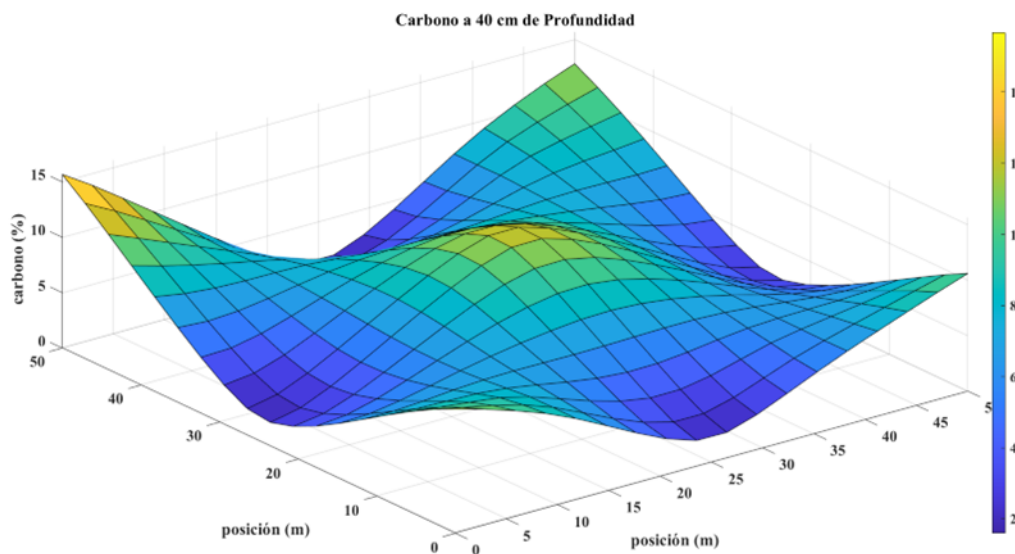


FIGURA 1. *Ejemplo de la distribución de carbono en una muestra de suelo. Tomada a 40 cm de profundidad, sobre una superficie de 2500 m², de acuerdo con las recomendaciones del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (*Elaboración a partir de un muestreo realizado por nuestro grupo en el departamento de Saboya, Colombia).*

Por otro lado, la variación temporal engloba las diferencias observadas en la producción de un mismo terreno entre una temporada y otra, y que pueden deberse al clima, condiciones de fertilización y/o empobrecimiento del suelo [4]. Los diferentes tipos de variación se suelen agrupar en un único término general denominado como variabilidad; las diferentes variabilidades que tienen una influencia significativa en la producción agrícola y se pueden clasificar en seis grupos [5], como se muestra en la Tabla 1.

La agricultura de precisión toma en cuenta las diferentes variabilidades sin limitarse sólo a la recopilación de información relativa a dichas variabilidades, sino que adicionalmente adopta prácticas administrativas como respuesta a esa variabilidad [3].

Dentro de la variabilidad del suelo, las condiciones fisicoquímicas (pH, contenido de nitrógeno, etc.), contenido de humedad, materia orgánica son algunos de los factores a tomar en cuenta y aquí es donde

los sensores juegan un papel de suma importancia [4].

Los sensores proporcionan información sobre variables físicas relacionadas con el área de cultivo, dicha información es analizada para obtener alimentos de mayor calidad y aumentar la producción [6]. La información proporcionada por los sensores permite modelar situaciones donde existe una gran cantidad de variables temporales [7]. Dentro de la agricultura, las variables más críticas a considerar son: el clima, los cultivos, características del suelo, distribución de la tierra, fertilizantes y agua; por lo tanto, el papel de los sensores es obtener información sobre el estado de las plantas y los cultivos.

El presente trabajo, muestra una compilación de los sensores de humedad, de conductividad eléctrica, de pH y redes de sensores más utilizados en la agricultura de precisión, el principio de funcionamiento de cada uno y ejemplos de estos sensores existentes en el mercado.

Tabla 1. Factores asociados a la variabilidad en la agricultura.

Tipo de Variación	Factores Involucrados
Producción	Distribución de la producción pasada y presente.
Campo	Topografía del campo, elevación, pendiente, aspecto, límites y corrientes de agua.
Suelo	Fertilidad del suelo, minerales presentes, propiedades físicas y químicas como: humedad, densidad, resistencia mecánica, conductividad eléctrica; pH, salinidad.
Cultivos	Densidad y altura del cultivo, contenido de clorofila de las hojas de los cultivos y calidad de los granos.
Factores Anómalos	Infestación de maleza, infestación de insectos, infestación de enfermedades, daños por viento.
Gestión	Prácticas de labranza, rotación de cultivos, aplicación de fertilizantes y plaguicidas.

USO DE SENSORES

Para poder obtener información de la variabilidad del suelo, la AP hace uso de diversas tecnologías, en particular se ha visto beneficiada con el desarrollo de tecnologías como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), sistemas de información geográfica (GIS), la miniaturización de los componentes de cómputo [8], el control automático, monitoreo en campo y remoto, cómputo móvil, procesamiento de información y las telecomunicaciones [7].

El desarrollo de sensores combinado con prácticas agrícolas adecuadas hace posible la implementa-

ción de la AP, sin dejar de lado la labranza, la siembra y la fertilización [8]. A casi 40 años de investigación en la AP esta ha tenido un resurgimiento debido al desarrollo de sensores nuevos y más precisos, así como de nuevas técnicas de medición, las cuales permiten identificar, cuantificar y ubicar espacialmente los parámetros más relevantes para analizar la variación espacial y temporal [3, 9].

Con los avances tecnológicos se ha reducido el tamaño y costo de los sensores, por esta razón es posible utilizar los sensores no sólo de manera individual, sino usando un conjunto de ellos para formar redes de sensores. Asimismo, se ha incrementado la precisión de los sensores, aumentado el tiempo útil de operación y se han desarrollado diversas técnicas que permiten obtener propiedades físicas del suelo, como: densidad, resistencia mecánica, humedad y conductividad eléctrica; propiedades químicas: pH y salinidad; capacidad de retención de agua. A continuación, se hará una revisión de algunos sensores de humedad, pH y conductividad eléctrica, sus principios de funcionamiento, así como las principales ventajas y desventajas.

Sensores de Humedad

La humedad del suelo es fundamental para las actividades en agricultura, silvicultura, hidrología e ingeniería civil [10]. En los suelos existen diferentes tipos de humedad, tales como humedad gravitacional, capilar, higroscópica [11, 12], cada una de ellas con diferentes características y por ende requiere de diferentes técnicas de medición [11].

En cultivos de maíz, los sensores de humedad se usan para evitar problemas de humedad específicos de los granos durante la cosecha y almacenamiento, para este tipo de grano, la humedad máxima de almacenamiento no debe superar el 16 % [4].

Existen diferentes tipos de sensores de humedad los cuales se pueden clasificar de acuerdo con el principio físico empleado para su funcionamiento, tal como los sensores de onda acústicos, capacitivos [13], resistivos [14], ópticos o de superficie; sin embargo, en la AP se utilizan principalmente sensores de tipo resistivo y capacitivos.

• *Sensores capacitivos*

Los sensores tipo capacitivo consisten en dos placas metálicas que pueden tener al suelo como medio dieléctrico entre las dos placas. Las placas que conforman el sensor pueden ser paralelas o ubicarse en el mismo plano. La presencia de agua en el suelo resulta en una variación de la constante dieléctrica de la mezcla de agua/suelo, la variación de constante dieléctrica se traduce en una variación de capacitancia, la cual puede ser medida a través de circuitos osciladores. Entre las principales desventajas en el uso de los sensores de tipo capacitivo, se puede mencionar la degradación de las placas (electrodos) que forman el sensor.

• *Sensores de microondas*

Con la finalidad de evitar los daños físicos y la degradación de los electrodos generados por contacto con el suelo, se ha propuesto el uso de microondas ya sea en el dominio del tiempo o la frecuencia para determinar la humedad del suelo. Un método propuesto es utilizar un cilindro de Kopecky en conjunto con una línea de transmisión coaxial, de esta forma la muestra de suelo sirve como dieléctrico para el arreglo coaxial Figura (2) [15]. Este tipo de sensor presenta una mayor robustez cuando se le compara con el sensor de electrodos, de igual manera presenta una menor área expuesta al suelo y adicionalmente el rango de frecuencias de trabajo hacen que se disminuya la degradación del electrodo.

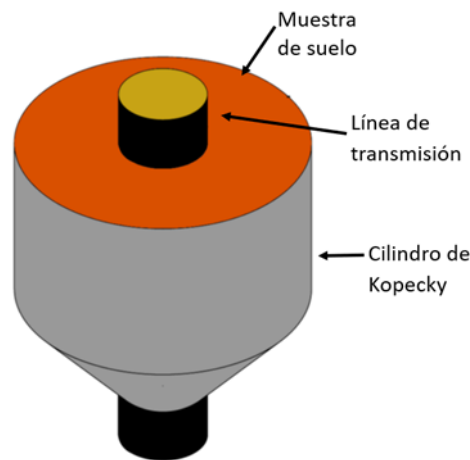


FIGURA 2. Sensor basado en un cilindro de Kopecky, una guía de onda al centro del sensor es la encargada de generar las microondas para la medición, en tanto que la muestra de suelo actúa como dieléctrico.

• *Sensores resistivos*

El principio de los sensores tipo resistivo se basa en la determinar la variación de resistividad del suelo como consecuencia de una variación en el contenido de humedad (Figura 3) [11]. Se insertan dos electrodos en el suelo y se hace circular una corriente a través de ellos, la resistividad del suelo provoca una caída de voltaje entre los electrodos, por lo cual se mide el voltaje a través del suelo. La conductividad efectiva del suelo aumenta a medida que aumenta el contenido de humedad [16]. Los electrodos empleados en estos están hechos principalmente de materiales nobles como el oro o la plata [17].

Para reducir costos, en los sensores resistivos de humedad se suele cambiar el material de los electrodos [18], en estos sensores dos sondas conductoras se utilizan para hacer circular una corriente a través del suelo, luego el sensor lee la resistencia del suelo para inferir el nivel de humedad. Este sensor emite un voltaje analógico dependiendo del nivel de humedad. Si bien es cierto que este tipo de sensores son económicos y fáciles de utilizar, la combinación entre la corriente, humedad y fabricación de los electro-

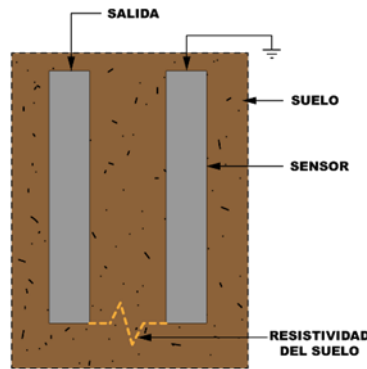


FIGURA 3. *Sensor resistivo, al establecer una corriente constante entre los electrodos, es posible determinar la resistividad del suelo.*

dos genera que los electrodos del sensor se degraden con el uso cuando se efectúan mediciones durante periodos prolongados, por lo cual es recomendable utilizar este tipo de sensores sólo durante cortos periodos de tiempo [14]. Los sensores resistivos suelen tener menor exactitud y precisión que los sensores capacitivos en materiales de bajo costo [18].

Sensores de Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo permite estimar de manera indirecta la salinidad, humedad, contenido de materia orgánica, y otras propiedades físicas y químicas del suelo. Asimismo, tiene una correlación significativa con el rendimiento del cultivo y el fertilizante [19, 20]. Es importante aclarar que, en los estudios geofísicos y agrícolas, el término conductividad eléctrica aparente (ECa) generalmente se refiere a la conductividad eléctrica (EC) de un medio homogéneo que produce la misma medición con el mismo instrumento [11].

Este tipo de sensores está compuesto de dos electrodos de geometría variable, pueden ser bidimensionales (en forma de láminas), o tridimensionales (en forma de alambres o cilindros), el material, área y longitud de los electrodos dependen del fabricante e impactan directamente en su costo. Su funcionamiento está basado en suministrar hacer circular una corriente alterna entre los electrodos con una frecuencia determinada [21]. Mediante un análisis de la impedancia como una función de la frecuencia de la corriente, se estima la conductividad eléctrica del suelo [12, 14].

Una variación de este método es presentada por Atkinson y Sophocleous (2014), esta aportación es un sensor para medir la conductividad eléctrica tanto en líquidos como sólidos utilizando un diseño de tres pares de electrodos junto con una fuente de corriente alterna de onda cuadrada y una fuente de voltaje alterno. Este diseño permite estimar la conductividad eléctrica del suelo en un arreglo compacto (Figura 4) [22].

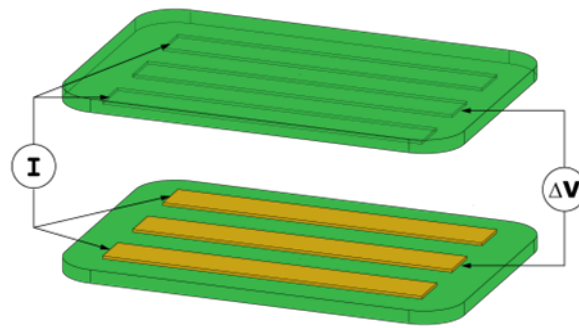


FIGURA 4. Celdas con 3 electrodos (Atkinson & Sophocleous, 2014).

Sensores de pH

El valor del pH es utilizado para medir el nivel de acidez o alcalinidad de un suelo [23]. La solubilidad de los minerales en suelos alcalinos y ácidos es diferente por lo cual, la medición de pH aporta información sobre la solubilidad de minerales [24]. Por otro lado, el pH tiene una correlación con el tipo de cultivo que se desea obtener, dado lo anterior, no existe un valor de pH adecuado para todos los suelos, el valor de pH adecuado para un cultivo en particular estará dado por el tipo de plantas en ese cultivo. Los suelos orgánicos muy ácidos, por ejemplo, requieren cantidades importantes de nitrógeno para el crecimiento de las plantas, esto debido al bajo contenido de nitrógeno, una muy escasa actividad microbiana, y una relación desfavorable entre el carbono y el nitrógeno [23].

Las sondas para medición de pH, en su versión más simple, constan de dos electrodos, un electrodo denominado de referencia, el cual genera un potencial constante e independiente del pH y un electrodo que mide el potencial generado en milivolts (mV) ambos inmersos en un electrolito de referencia y separados mediante una membrana. La diferencia del potencial dada entre la membrana selectiva y la referencia es medida y convertida en actividad del ion Hidrógeno [24].

Entre los ejemplos de sistemas de medición de pH se pueden mencionar los de electrodo de encapsulamiento metálico. Este tipo de electrodos son empleados para medir el pH directamente del suelo, Zambrano et al (2023) presentan un sensor de este tipo en donde la medición de pH se determina mediante un voltaje de salida [25]. La principal característica de este sensor es que tiene un voltaje de salida con un rango de voltaje de ± 800 mV, en este sistema, los voltajes negativos indican acidez, en tanto que los voltajes positivos indican alcalinidad.

Otro sensor es el reportado por Gutiérrez (2023) y se denomina “Veris Mobile Sensor Platform (MSP) with pH Manager” [26]. Los electrodos de este sensor son de antimonio y el sensor funciona mediante un potenciómetro de contacto directo. Las muestras de suelo en este sensor son colectadas mediante un sistema hidráulico accionado por el usuario. Un aspecto importante de este sistema es que ya se encuentra

en el mercado y es comercializado por la empresa Veris Technologies.

Redes de Sensores

Si bien, una red de sensores no constituye un sensor diferente, sí es una de las herramientas más empleadas en la AP para poder monitorear y centralizar la información de un conjunto de sensores sobre un área específica. Una red de sensores inalámbrica (WSN) es un sistema formado por sensores distribuidos espacialmente para monitorear en conjunto condiciones del ambiente [27]. En su aplicación dentro de la AP, las redes de sensores se utilizan para obtener información sobre la temperatura, humedad relativa, radiación solar, entre otros, en diferentes ubicaciones.

La detección, comunicación y el cómputo (mediante el uso de hardware, software y algoritmos), son las tres funciones básicas que realizan las redes de sensores [6]. Una WSN está formada por varios componentes llamados nodos. Los nodos son dispositivos que se utilizan para recoger la información requerida para una aplicación específica. Estos desempeñan varias funciones y se clasifican en dos grupos Figura (5):

1. Nodos fuente/nodos de sensores: están distribuidos y recogen la información del sensor y la envían al nodo base
2. Nodo base: recolecta los datos de los nodos fuente y funciona como nodo de enrutamiento.

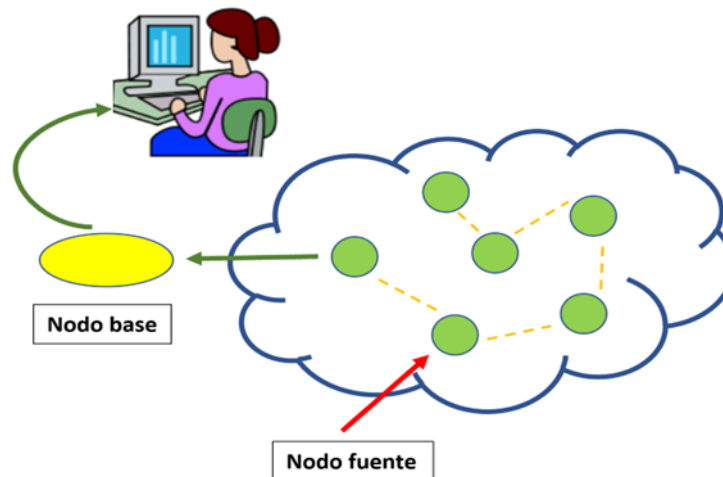


FIGURA 5. Red de sensores inalámbrica (WSN).

Existe una variante de las WSN, donde se añaden actuadores (WSAN). La inclusión de actuadores aumenta la capacidad de la WSN de monitorear el control [6]. Las tecnologías de comunicación inalám-

brica como ZigBee, Bluetooth, Wibree y WiFi son las más usadas en redes de sensores. Estas tecnologías tienen diferentes características y se muestran en la Tabla 2 [26].

Tabla 2. Tecnologías de comunicación inalámbrica y sus características.

Estandar	Ancho de banda (Mbps)	Frecuencia (GHz)	Consumo de potencia (mA)	Alcance (m)
ZigBee	250 (kbps)	2.4	30 transmitiendo 3 en reposo	30 – 1600
Bluetooth	1	2.4	40 transmitiendo 0.2 en reposo	10 – 100
Wibree*	1	2.4	-	5 – 10
WiFi	Hasta 54	2.4	400 transmitiendo 20 en reposo	30 – 45
WiFi 6E	574–9608	5	25.5 W	120

* En el caso de Wibree, aumenta su alcance hasta 30m cuando se combina con Bluetooth 2.1.

PERSPECTIVAS

Los sensores de contacto permiten el desarrollo de nuevas tecnologías de AP para la medición a distancia más avanzadas, a través de los datos recolectados para un análisis centralizado darán datos de optimización de los cultivos.

La selectividad de los sensores es dependiente de las condiciones particulares como: tipo de cultivo, resolución necesaria, rango de medición, precisión, costo, porcentaje de error, tiempo de respuesta, dimensiones, calibración y sensibilidad.

La aplicación de la IA permite avanzar hacia cultivos artificiales como la hidroponía, tal es el caso del cultivo de azafrán [28]. Los avances en el Internet de las Cosas (IoT) permiten la aplicación de AP a cultivos de menor escala al disminuir los costos de implementación de los sistemas de monitoreo y control.

El análisis de costos es el paso posterior a una optimización de parámetros y la inteligencia de negocios puede dar los parámetros de optimización a los medianos y grandes productores, que son los que por escala de negocios pueden sacar mayor provecho de los datos. Como en el caso de Portugal, se requiere de la implementación de sistemas centralizados para el análisis de datos de cultivo y producción por medio de dinámicas públicas o privadas pues no están disponibles en la actualidad [29].

CONCLUSIONES

El desarrollo de la agricultura de precisión ha sido posible gracias a la combinación de diversas áreas del conocimiento, en particular, los sensores representan un papel importante dentro del desarrollo de la agricultura de precisión. Se han desarrollado sensores para medir diferentes propiedades físicas de los suelos, además de que la miniaturización de estos ha permitido su uso, cada vez con más frecuencia, aunado a lo anterior el creciente uso de este tipo de sensores ha disminuido los costos poniendo los sensores al alcance de cada vez más agricultores. El uso intensivo de los sensores y la necesidad de medir cada vez más variables ha incrementado el número de investigaciones referentes al uso de sensores en la agricultura de precisión.

La elección del tipo de sensor a utilizar para cada una de las variables descritas no debe basarse sólo en la variable a medir sino debe tomarse en cuenta el área a vigilar, la precisión del sensor, facilidad o dificultad de uso, así como desgaste del sensor. Este trabajo presenta una breve descripción sobre el principio de funcionamiento de algunos sensores utilizados en la AP, en particular, sensores de humedad, de conductividad eléctrica y de pH. También se muestra información sobre las redes de sensores y estándares de comunicación de estos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a N.P. Arias por el muestreo y la información para la elaboración de la Figura 1.

REFERENCIAS

- [1] J. Eise and K. A. Foster, *How to feed the world*. Washington, DC: Island Press, 2018.
- [2] O. de las N. U. para la A. y la A. FAO, “La alimentación y la agricultura: Claves para la ejecución de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible,” <https://www.fao.org/3/a-i6030s.pdf>, 2016, [En línea].
- [3] R. Bongiovanni, E. C. Mantovani, S. Best, and A. Roel, *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo: PROCISUR/IICA, 2006, [En línea]. Disponible en: <https://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Agricultura-Moderna-Precision.pdf>.
- [4] O. Santillán and M. E. R. Rodríguez, “Agricultura de precisión,” abril 2018, accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf.
- [5] N. Zhang, M. Wang, and N. Wang, “Precision agriculture—a worldwide overview,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 36, no. 2-3, pp. 113–132, nov 2002.
- [6] J. A. Padilla-Medina, L. M. Contreras-Medina, M. U. Gavilán, J. R. Millan-Almaraz, and J. E. Alvaro, “Sensors in precision agriculture for the monitoring of plant development and improvement of food production,” *J. Sens.*, vol. 2019, p. e7138720, jul 2019.

- [7] P. J. Zarco-Tejada, N. Hubbard, and P. Loudjani, "Research centre (jrc) of the european commission, monitoring agriculture resources (mars) unit h04. precision agriculture: an opportunity for eu farmers: potential support with the cap 2014-2020," jun 2014, [En línea]. Disponible en: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT\(2014\)529049_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT(2014)529049_EN.pdf).
- [8] A. ur Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, "A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture," *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, feb 2014.
- [9] R. R. S. et al., "Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming," *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 11, no. 4, ago 2018.
- [10] K. Shinghal, A. Noor, N. Srivastava, and R. Singh, "Intelligent humidity sensor for wireless sensor network agricultural application," *Int. J. Wirel. Mob. Netw.*, vol. 3, no. 1, pp. 118–128, feb 2011.
- [11] L. C. Caicedo-Rosero, F. de J. Méndez-Ávila, E. Gutiérrez-Zeferino, and J. de J. A. Flores-Cuautle, "Medición de humedad en suelos, revisión de métodos y características," *Pädi Bol. Científico Cienc. Básicas E Ing. ICBI*, vol. 9, no. 17, jul 2021.
- [12] M. S. Kumar, T. R. Chandra, D. P. Kumar, and M. S. Manikandan, "Monitoring moisture of soil using low cost homemade soil moisture sensor and arduino uno," in *2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. Coimbatore, India: IEEE, ene 2016, pp. 1–4.
- [13] W. Gardner, "The capillary potential and its relation to soil moisture constants," p. 357, nov 1920, accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1920/11000/the_capillary_potential_and_its_relation_to.3.aspx.
- [14] M. Saleh, I. H. Elhajj, D. Asmar, I. Bashour, and S. Kidess, "Experimental evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors," in *2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET)*. Beirut, Lebanon: IEEE, nov 2016, pp. 179–184.
- [15] B. Will and V. Crnojevi, "Microwave soil moisture sensors," oct 2013.
- [16] P. A. et al., "A wireless multi-sensor system for soil moisture measurement," in *2015 IEEE SENSORS*. Busan: IEEE, nov 2015, pp. 1–4.
- [17] C. Kutzner, R. Lucklum, R. Torah, S. Beeby, and J. Tudor, "Novel screen printed humidity sensor on textiles for smart textile applications," in *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*. Barcelona, Spain: IEEE, jun 2013, pp. 282–285.
- [18] S. Adla, N. K. Rai, S. H. Karumanchi, S. Tripathi, M. Disse, and S. Pande, "Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 363, 2020.

- [19] C. Ma, J. Li, and S. Yu, "Method of soil electrical conductivity measurement based on multi-sensor data fusion," in *2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*. Jilin, China: IEEE, ago 2011, pp. 1219–1221.
- [20] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer International Publishing, 2016.
- [21] T. Yuwono, W. B. Pramono, I. Ardi, L. Hakim, and M. Ismail, "Design of the remote sensing circuit for water conductivity," in *2015 International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*. Langkawi, Malaysia: IEEE, ago 2015, pp. 84–88.
- [22] J. K. Atkinson and M. Sophocleous, "A novel thick-film screen printed electrical conductivity sensor for measurement of liquid and soil conductivity," in *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*. Valencia, Spain: IEEE, nov 2014, pp. 86–89.
- [23] R. E. Lucas and J. F. Davis, "Relationships between ph values of organic soils and availabilities of 12 plant nutrients," *Soil Sci.*, vol. 92, no. 3, p. 177, sep 1961, accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1961/09000/relationships_between_ph_values_of_organic_soils.5.aspx.
- [24] L. M. Ciganda, "Electrodos para medir ph," jun 2004, [En línea]. Disponible en: <http://www.nib.fmed.edu.uy/Ciganda.pdf>.
- [25] N. J. Z. Sanchez, E. F. C. Quintero, A. M. González, and Y. E. V. Lugo, "Diseño e implementación de un instrumento electrónico de medida de ph para terreno agrícola," Ibagué - Tolima, 2017, accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.unisimon.edu.co/index.php/innovacioning/article/view/3042>.
- [26] A. P. Gutiérrez Hernández, "Evaluación del uso potencial del sensor veris ph manager considerando la influencia de la humedad del suelo y de la fracción arcilla en sus lecturas," Bogotá, 2018, accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/941>.
- [27] F. Aparicio and Urbano-Molano, "Redes de sensores inalámbricas aplicadas a optimización en agricultura de precisión para cultivos de café en colombia," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 5, no. 1, p. 46, ago 2013.
- [28] K. Kour and et al., "Monitoring ambient parameters in the iot precision agriculture scenario: An approach to sensor selection and hydroponic saffron cultivation," *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8905, nov 2022.
- [29] D. F. Ferreira, J. Bernardino, C. D. Manjate, and I. Pedrosa, "Business intelligence and business analytics applied to the management of agricultural resources," in *2021 16th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*. Chaves, Portugal: IEEE, jun 2021, pp. 1–6.