

CALIBRACIÓN DE SENSORES DE RESISTENCIA EN LA MEDICIÓN DEL POTENCIAL MÁTRICO EN TRES TIPOS DE SUELOS EN CONDICIONES DE INVERNADERO

CALIBRATION OF RESISTANCE SENSORS IN THE MEASUREMENT OF MATRIX POTENTIAL IN THREE TYPES OF SOILS UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

Medina-Puente, A.^{1*}, García-Delgado, M. A.², Varela-Fuentes, S. E.¹, Ramírez-De-León, J. A.³, Ruvalcaba-Sánchez, L. G.³

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería y Ciencias. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. ²Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. ³Universidad Autónoma de Tamaulipas, Rectoría, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

*Autor de correspondencia: armedina@docentes.uat.edu.mx

ABSTRACT

Monitoring water content in the soil is an appropriate tool to increase the efficiency in the application of agricultural irrigation. Modern agriculture and technification of the high-frequency irrigation systems such as those of drip irrigation and micro spraying need fast, precise and automatized measures to monitor the soil moisture content. To achieve this, appropriate and economic techniques, instruments and tools are needed, such as the resistance-tension sensor of soil water potential, Watermark[®] Model 200SS (Irrometer Company, Inc.) due to its versatility, ease in installation, and measuring exactness of the matrix potential in soil water retention, with more frequent uses of instruments. Several of these sensors were evaluated and calibrated with the gravimetric method under greenhouse conditions to determine their punctual and continuous variation to measure the soil matrix potential (SMP), temperature and variation in three types of soils from different localities; the texture, apparent density, real density, and variation of the moisture content at different tensions were determined in each soil. The moisture contents of the soil measured with the resistance-tension sensors were compared to the readings recorded with direct-measurement pressure gauges, the sensors and the gauges were installed at two depths of the soil, of 0.30 and 0.60 m. Resistance-tension Watermark[®] 200SS sensors were evaluated, compared and analyzed, of continuous measurement of the soil matrix potential and conventional direct-measurement pressure gauges installed on soil sample columns representative of three citrus producing regions in the central area of the state of Tamaulipas. The three equations of logarithmic adjustment from each were highly significant; the best determination coefficient (R^2) of 0.9772 was found in the adjustment model of the soil in El Barretal, Tamaulipas.

Keywords: water content in the soil, matrix potential, granular matrix sensor, pressure gauge.

RESUMEN

El monitoreo del contenido de agua en el suelo es una herramienta apropiada para incrementar la eficiencia en la aplicación del riego agrícola. La agricultura moderna y la tecnificación de los sistemas de riego de alta frecuencia como son los de riego por goteo y microaspersión necesitan de mediciones rápidas, precisas y automatizadas para monitorear el contenido de humedad del suelo. Para lograr lo anterior se requieren técnicas, instrumentos y herramientas

apropiadas y económicas como el sensor de resistencia-tensión del potencial hídrico del suelo Watermark® Modelo 200SS (Irrrometer Company, Inc.), por su versatilidad, facilidad de instalación y exactitud de medición del potencial mátrico en la retención del agua del suelo, con usos más frecuente de instrumentos. Varios de estos sensores se evaluaron y se calibraron con el método gravimétrico en condiciones de invernadero para determinar su variación puntual y de manera continua en la medición del potencial mátrico del suelo (PMS), temperatura y su variación en tres tipos de suelos de diferentes localidades, se determinó la textura, densidad aparente, densidad real y la variación del contenido de humedad a diferentes tensiones en cada suelo. Los contenidos de humedad del suelo medidos con los sensores de resistencia-tensión se compararon con las lecturas registradas con tensiómetros de medición directa, los sensores y los tensiómetros se instalaron a dos profundidades de suelo de 0.30 y 0.60 m. Se evaluaron, compararon y analizaron sensores de resistencia-tensión Watermark® 200SS, de medición continua del potencial mátrico del suelo y tensiómetros convencionales de medición directa, instalados en columnas de muestras de suelo representativas de tres regiones citrícolas del centro del estado de Tamaulipas. Las tres ecuaciones de ajuste logarítmico de cada fueron altamente significativas; el mejor coeficiente de determinación (R^2) de 0.9772 lo presentó el modelo de ajuste del suelo de El Barretal, Tamaulipas.

Palabras clave: contenido de agua en el suelo, potencial mátrico, sensor de matriz granular, tensiómetro.

INTRODUCCIÓN

El agua destinada al riego en la agricultura de alto rendimiento está cada vez más limitada, el monitoreo del contenido de agua en el suelo es esencial para optimizar la producción, conservar el agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero (Enciso *et al.*, 2007; Levidow *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2017). Esto es decisivo para el desarrollo de las plantas, el rendimiento y calidad de los productos agrícolas (Intrigliolo y Castel, 2004). En áreas agrícolas donde el agua es un factor limitante, el riego es necesario para garantizar el crecimiento de las plantas (Fraga *et al.*, 2012). Por otro lado, el exceso de riego promueve e induce las pérdidas de agua, y la energía potencialmente productiva; agua y nutrientes, debido que éstos pueden lixiviarse y drenarse profundamente al agua subterránea (Périard *et al.*, 2012; Suresh y Raju, 2014). Una opción para alcanzar estos objetivos es implementar una estrategia de riego y evitar la lixiviación, para el suministro de agua orientado a la demanda de la planta y de acuerdo con el monitoreo del contenido del agua en el suelo (Morgan *et al.*, 2001). La medición de la tensión de la humedad del suelo es útil para determinar el momento oportuno de aplicar el riego basado en la textura del suelo y la especie cultivada (Leib *et al.*, 2003; Zermeño *et al.*, 2007).

En este sentido, el estado del agua del suelo puede describirse por el contenido de agua del suelo (SWC por sus siglas en inglés) o por el potencial mátrico del suelo (PMS) o por ambos. El PMS representa la energía que se necesita

aplicar para extraer agua de la matriz del suelo (Nolz *et al.*, 2016). El monitoreo de la retención y contenido de agua en el suelo permite que la programación del riego se adapte a los requisitos particulares de cada cultivo y campo (Thompson *et al.*, 2006; Evett *et al.*, 2011). Levidow *et al.* (2014), señalan que las prácticas de riego innovadoras pueden mejorar la eficiencia de agua, obteniendo beneficios de la tecnología y ventajas económicas, como maximizar el rendimiento por unidad de superficie, minimizar los requerimientos energéticos y el rendimiento máximo al agua aplicada.

Para medir el contenido de agua en el suelo, actualmente se utilizan los sensores de matriz granular (Vellidis *et al.*, 2008) y el tensiómetro el cual se adapta a los sistemas de riego por goteo y microaspersión (Zermeño *et al.*, 2007; Buttaro *et al.*, 2015). Es un método tradicional para determinar la tensión de agua en el suelo, es la tensión de todo el sistema radicular que debe superar para extraer agua en el suelo contiguo (Leib *et al.*, 2003; Shock y Wang, 2011). Los tensiómetros son muy utilizados en el manejo de la humedad del suelo especialmente en cítricos (Campbell y Mulla, 1990; Paramasivam *et al.*, 2000; Zermeño *et al.*, 2007) y hortalizas (Thompson *et al.*, 2007; Srbínovska *et al.*, 2015).

Por tanto, el uso de sensores de matriz granular (GMS) y los tensiómetros, que miden el PMS y el contenido de humedad del suelo, son considerados por especialistas como instrumentos esenciales para la programación y calendarización del riego de los cultivos (Irmak y Haman, 2001; Soulis *et al.*, 2015). Este tipo de sensores proporcionan información útil para regular las con-

diciones requeridas por cada una de estas estrategias de programación de riego (Navarro-Hellín et al., 2015).

Los tensiómetros y los sensores de matriz granular como son los sensores de resistencia-tensión Watermark®, pueden ser instrumentos muy útiles en la programación del riego agrícola (Marković et al., 2016). Sin embargo, la relación entre el potencial mátrico del agua medido con los tensiómetros y los sensores de resistencia-tensión deben determinarse antes de que estos instrumentos se puedan utilizar de manera efectiva en condiciones de campo (Bórquez-López et al., 2013). El objetivo de esta investigación fue calibrar los sensores resistencia-tensión Watermark® contra el PMS y comparar la relación que existe entre el contenido de agua en muestras de suelos de tres localidades de la zona centro de Tamaulipas, medidos con tensiómetros y los sensores de matriz granular Watermark®.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del sitio experimental. El estudio se realizó en el periodo comprendido del 18 de julio al 19 de octubre del 2016 en condiciones de invernadero en el Centro Experimental de Transferencia de Tecnología de la Facultad de Ingeniería y Ciencias, de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, ubicado en Cd. Victoria, Tamaulipas. El sitio se ubica geográficamente a 23° 42' 56.7" LN y 99° 09' 09.9" LO, a una altitud media de 327 m. La nave de invernadero está cubierta con polietileno, policarbonato y malla antiáfidos, cuenta con ventanas cenitales y laterales. Las dimensiones de la nave de invernadero son de 40 m de largo por 20 m de ancho; dicha nave no cuenta con calefacción ni extractores de aire, en dicho sitio se instalaron 3 columnas de madera, cada una con diferentes muestras de suelo representativas de las regiones citrícolas de Tamaulipas: Padilla (Sitio Las Águilas, 24° 02' 00" LN, 98° 54' 00" LO y 140 m de altitud), Barretal (Sitio La Gloria, 24° 05' 21" LN, 99° 06' 44.4" LO y 190 m de altitud) y Llera (Sitio La Huerta, 23° 19' 04" LN, 99° 01' 27" LO y 291 m de altitud). Para la medición del PMS se instalaron sensores Watermark® y tensiómetros convencio-

nales y de medición directa en cada columna de suelo, a 0.30 y 0.60 m de profundidad.

Características físicas y químicas de los suelos utilizados en el estudio. Con el fin caracteriza cada muestra representativa, se analizaron cinco muestras de suelos de cada una de las tres localidades en estudio. Los resultados de los análisis de suelo se presentan en el Cuadro 1.

Calibración del sensor resistencia-tensión Watermark®. Para convertir la salida de resistencia eléctrica de los sensores resistencia-tensión Watermark® 200SS en PMS, se hizo la calibración en un ambiente de laboratorio e invernadero. Durante la calibración, se comparó los datos de salida (PMS) del registrador de datos con las lecturas tomados del tensiómetro manualmente. La calibración se realizó en el mes de mayo a junio en el laboratorio y el mes de julio a octubre del 2016 dentro del invernadero. Para evaluar y calibrar el funcionamiento del sensor resistencia-tensión, se instalaron juegos completos a dos diferentes profundidades a 0.30 y 0.60 m, dentro de tubos de PVC de 6" de diámetro por 1 m de largo con suelo representativo del sitio Llera, en el laboratorio y en tres columnas de suelo de 0.80 m de largo por 0.45 m de ancho, adaptados en un cajón de madera dentro del invernadero, en cada profundidad del suelo, se instaló un juego de instrumentos el cual estuvo compuesto de dos sensores Watermark®, con un tensiómetro de medición directa y un sensor de temperatura del suelo DS18B20 (Maxim Integrated, San José, CA, EE.UU.). Los tratamientos se saturaron un día antes de la instalación de los sensores, en promedio se aplicaron 40 L de agua en cada columna y se drenaron 3.7 L, permitiendo así una fácil instalación y buen contacto con el suelo. Los sensores se humedecieron días antes para tener una mejor respuesta de su lectura y calibración según lo recomendado por el fabricante (Irrometer Company, Inc.) y se dejaron reposar por un periodo de 24 h para realizar las mediciones continuas de tensión.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los suelos de cada una de las localidades citrícolas representativas de Tamaulipas.

Sitio	Profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Textura	Dr	Dap	pH
		%				(g cm ⁻³)		
Llera	0 - 30	8.0	24.0	68.0	Arcilla	2.38	1.27	8.4
Padilla	0 - 30	49.3	22.7	28.0	Franco arcillo arenosa	2.44	1.40	8.7
El Barretal	0 - 30	30.0	28.0	42.0	Arcilla	2.33	1.32	8.3

Nota: Dr es la densidad real; Dap es la densidad aparente; pH es el potencial hidrógeno del extracto del suelo.

El suelo se secó por evaporación lenta y continua en la superficie del suelo. El experimento continuo hasta que el aire entro en los tensiómetros.

Curva de calibración de tensión en los sensores. Se analizaron las propiedades de retención-tensión del contenido de humedad o potencial mátrico en los tres suelos. En los tres suelos, se registraron los potenciales matriciales de los sensores Watermark® y los tensiómetros analógicos o convencionales a dos diferentes profundidades de suelo a 0.30 m y 0.60 m. La instalación de los sensores y los tensiómetros convencionales se realizó en el primer riego el 16 de julio del 2016, el estudio se realizó durante el periodo comprendido del 17 de julio al 17 de octubre del 2016 esta actividad se hizo en las tres columnas de suelo.

La medición de la temperatura edáfica se realizó a 0.25 m de profundidad, estas medidas se realizaron con un sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Maxim Integrated, San José, CA, EE. UU.).

El rango de valores de contenido de humedad gravimétrica se realizaron con la calibración cruzada, el contenido de humedad determinado por el método gravimétrico (Zermeño *et al.*, 2007) se inició cuando el tensiómetro de medición directa instalado a una profundidad del suelo de 0.30 m indicó una tensión de 5 kPa, en cada suelo representativo de cada localidad, se realizaron tres repeticiones por tensión y tipo de suelo, el resto de mediciones se realizaron a tensiones de 10, 15, 20, 35, 60 y 85 kPa, éstos fueron el punto de partida para realizar y analizar las comparaciones que se realizaron para estimar y ajustar las lecturas de resonancia magnética medidas por el sensor Watermark®, durante el periodo de estudio. Mediante el uso del paquete SAS (2010) se realizó el análisis de varianza de la ecuación de regresión logarítmica (Leib *et al.*, 2003; Zermeño *et al.*, 2007), en cada suelo se utilizaron los datos de las siete tensiones de humedad del suelo (x) y el contenido de humedad expresada como Pw en % de tres repeticiones por cada valor de tensión, expresada como la variable de respuesta (y); en cada suelo representativo por localidad se determinó la ecuación o modelo de ajuste con los parámetros probabilidad ($Pr \geq F$), coeficientes de determinación (R^2) y coeficientes de variación (CV).

Monitoreo del potencial mátrico del agua del suelo (SWP). Para monitorear el potencial mátrico del suelo

(Ψ_m , PMS), se midió continuamente con 6 sensores resistencia-tensión Watermark®, dos instrumentos, instalados a dos profundidades 0.30 m y 0.60 m por tipo de suelo respectivamente. El registrador de datos (Data-logger) para monitorear el Ψ_m está diseñado y adaptado en la plataforma Arduino (Arduino, 2017), utilizado por varios autores que ensamblaron el hardware abierto e instrumentación para aplicaciones en la agricultura de bajo costo (Fisher y Gould, 2012; Payero *et al.*, 2017).

Dado que la confiabilidad y exactitud del sensor varía ligeramente con la temperatura (T), se incluyó el factor de corrección de temperatura, basado en la ecuación de calibración respectiva (Spaans y Baker, 1992). Para obtener el potencial mátrico del agua del suelo la ecuación de calibración utilizada para convertir los valores de resistencia eléctrica medida con los sensores a diferentes valores fue calculada mediante la ecuación [1] propuesto por Shock *et al.* (1998) y fueron utilizados por Fisher y Gould (2012) y Payero *et al.* (2017).

$$SWP \text{ (kPa)} = \frac{4.093 + 3.213R_s}{[(1 - 0.009733R_s) - (0.0101060 T_s)]}$$

Ecuación 1

Dónde: SWP es el potencial mátrico del agua del suelo expresada en kPa, R_s es la resistencia de salida del sensor expresada en $k\Omega$ y T_s es la temperatura estimada del suelo expresada en °C.

La prueba se realizó usando Arduino UNO y un adaptador de registro de datos (Sd Card Shield), que permitió registrar los datos recopilados individuales de cada sensor Watermark®. El algoritmo para esta prueba se desarrolló usando la ecuación 1 para calcular potencial mátrico del suelo. El registro de datos se realizó diariamente a las 8:30 y 17:00 h.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del sensor de resistencia-tensión y del tensiómetro convencional. La Figura 1 muestra los datos de calibración del sitio de Padilla con fines de ilustración. Las lecturas se registraron a las 8:30 y 17:00 h diariamente en dos ciclos de humedecimiento y secado del suelo.

Modelos de ajuste por regresión del contenido de humedad gravimétrica y los potenciales mátricos (tensión de humedad) en los tres suelos. Las ecuaciones

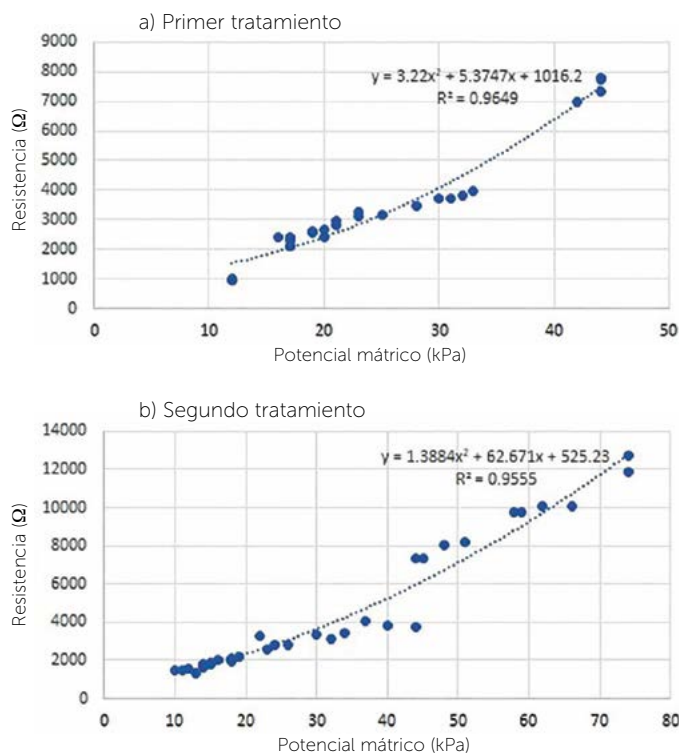


Figura 1. Potencial mátrico del agua del suelo, registrados con un tensiómetro en función de la resistencia del sensor utilizando un sensor de humedad del suelo Watermark® modelo 200SS a 21 °C. Datos provienen de un solo sensor del sitio de Padilla. Las lecturas se registraron a las 8:30 y 17:00 h diariamente en dos ciclos de humedecimiento y secado del suelo.

de regresión de los diferentes contenidos de humedad del suelo a distintos rangos de tensión en los suelos de las tres localidades presentaron una tendencia logarítmica (Leib et al., 2003; Zermeño et al., 2007). El mayor contenido de humedad del suelo a una tensión de 5 kPa lo presentó el suelo de Llera, este suelo de textura arcillosa presenta el mayor contenido de partículas finas, posteriormente los contenidos de humedad del suelo descendieron gradual y consecutivamente en los suelos de Barretal y Padilla respectivamente (Figura 2; Cuadro 1).

Las tres ecuaciones o modelos de ajuste fueron altamente significativos ($P < 0.0001$), con coeficientes de determinación (R^2) mayores del 90%, el valor más alto en

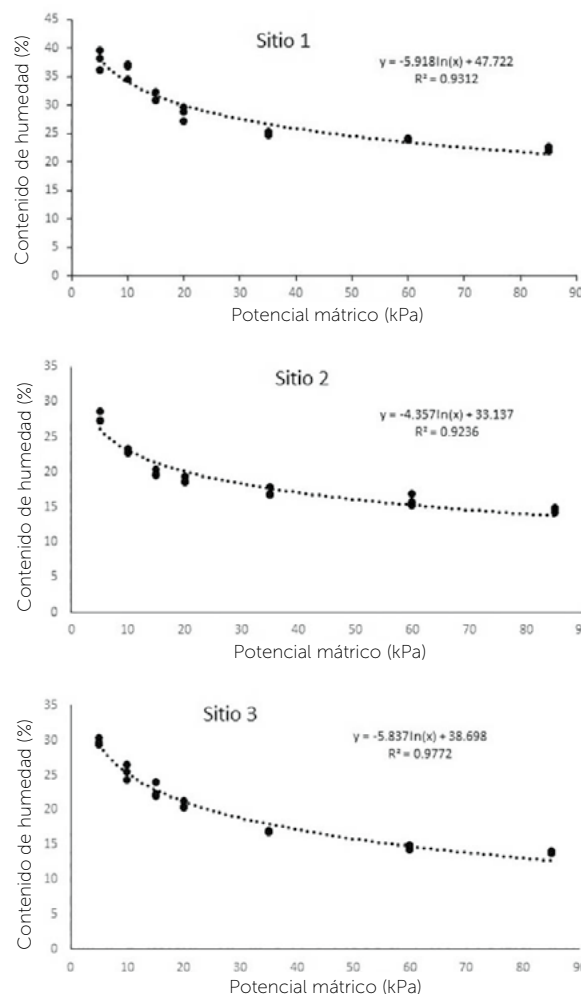


Figura 2. Ecuaciones de regresión logarítmica de la tensión o potencial mátrico y el contenido de humedad (Pw) del suelo observadas en los tres suelos: Sitio 1 Llera, Sitio 2 Padilla, Sitio 3 Barretal.

la ecuación de regresión lo presentó el suelo del sitio 3 Barretal, los coeficientes de variación presentaron variaciones de 4.22 a 6.23, lo que indica una alta uniformidad en los contenidos de humedad a las diferentes tensiones medidos en cada suelo, a su respectiva ecuación de regresión logarítmica (Cuadro 2).

CONCLUSIONES

La practicidad de la utilización del sensor de humedad Watermark® permite registrar los cambios de humedad basado en la temperatura ambiente y su efecto de

Cuadro 2. Ecuaciones de regresión del contenido de humedad del suelo expresada en porcentaje (Pw) a diferentes tensiones en los suelos de los tres sitios de estudio, Tamaulipas.

Sitio	Ecuación de ajuste	Pr≥F	R ²	CV
Llera	Y=47.722-5.918ln(x)	0.0001	0.9312	5.34
Padilla	Y=33.137-4.357ln(x)	0.0001	0.9236	6.23
Barretal	Y=38.698-5.837ln(x)	0.0001	0.9772	4.22

Y es el Pw del suelo expresado en por ciento; x es la tensión de la humedad expresada en kPa.

la temperatura de suelo y la medición continua de las tensiones a diferentes profundidades del suelo, lo que conduce a ahorrar tiempo, evitar el uso de la columna de agua del tensiómetro convencional y además permite la medición en tiempo real del potencial mátrico del suelo.

Esta evaluación de la variación de los contenidos de humedad a diferentes potenciales mátricos realizados en los tres suelos cítricos, permitirá utilizar los resultados en la segunda etapa de la investigación como guía de riego, con la aplicación del software para iniciar los riegos en una huerta de naranjo del sitio Padilla, Tamaulipas.

LITERATURA CITADA

- Arduino. 2017. Una plataforma de creación de prototipos de electrónica de código abierto. Disponible en línea en: <http://www.arduino.cc>
- Bórquez-López R. A., Valdez-Torres L. C., Yépez-González E., Garatuzapayán J. 2013. Calibración del sensor de matriz granular (SMG) para determinar la retención de agua en el suelo para la programación de riego en tomate en el Valle del Yaqui. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 1: 11-16.
- Buttaro D., Santamaria P., Signore A., Cantore V., Boari F., Montesano F. F., Parente A. 2015. Irrigation Management of Greenhouse Tomato and Cucumber Using Tensiometer: Effects on Yield, Quality and Water Use. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4: 440-444.
- Campbell G. S., Mulla D. J. 1990. Measurement of soil water content and potential. *In: Stewart B. A., Nielsen D. R. (eds.). Irrigation of agricultural crops*. ASA, Madison, EE. UU. pp. 127-142.
- Enciso J., Porter P., Peries X. 2007. Irrigation Monitoring with Soil Water Sensors (Spanish). Disponible en línea en: <http://hdl.handle.net/1969.1/87470>
- Evelt S. R., Schwartz R. C., Mazahrih N. Th., Jitan M. A., Shaqir I. M. 2011. Soil water sensors for irrigation scheduling: Can they deliver a management allowed depletion? *Acta Horticulturae* 888: 231-237.
- Fisher D. K., Gould P. J. 2012. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. *Modern Instrumentation* 1: 8-20.
- Fraga H., Malheiro A. C., Moutinho-Pereira J., Santos, J. A. 2012. An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security* 1: 94-110.
- Intrigliolo D. S., Castel J. R. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23: 93-102.
- Irmak S., Haman D. Z. 2001. Performance of the Watermark Granular Matrix Sensor in Sandy Soils. *Applied Engineering in Agriculture* 17: 787-795.
- Irrrometer. 2010. Watermark soil moisture sensor-Model 200SS. Specification document. Irrrometer Company: PO Box 2424, Riverside, CA. Disponible en línea en: <http://www.irrometer.com/pdf/sensors/403%20WATERMARK%20Sensor-WEB.pdf>
- Leib B.G., Jabro J. D., Matthews, G. R. 2003. Field Evaluation and Performance Comparison of Soil Moisture Sensors. *Soil Science* 168(6): 396-408.
- Levidow Les., Zaccaria D., Maia R., Vivas E., Todorovic M., Scardigno A. 2014. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management* 146: 84-94.
- Marković M., Josipović M., Sostaric J., Zebec V., Rapcan I. 2016. Effectiveness of granular matrix sensors in different irrigation treatments and installation depths. *Journal of Agricultural Sciences* 61: 257-269.
- Morgan K. T., Parsons L.R., Adair Wheaton T. 2001. Comparison of laboratory- and field-derived soil water retention curves for a fine sand soil using tensiometric, resistance and capacitance methods. *Plant and Soil* 234: 153-157.
- Navarro-Hellín H., Torres-Sánchez R., Soto-Valles F., Albaladejo-Pérez C., López-Riqueleme J. A., Domingo-Miguel R. 2015. A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management. *Agricultural Water Management* 151: 64-74.
- Nolz R., Cepuder P., Balas J., Loskandl W. 2016. Soil water monitoring in a vineyard and assessment of unsaturated hydraulic parameters as thresholds for irrigation management. *Agricultural Water Management* 164: 235-242.
- Paramasivam S., Alva A. K., Ali F. 2000. An evaluation of soil water status using tensiometers in a sandy soil profile under citrus production. *Soil Science* 165: 343-353.
- Payero J., Mirzakhani-Nafchi A., Khalilian A., Qiao X., Davis R. 2017. Development of a Low-Cost Internet-of-Things (IoT) System for Monitoring Soil Water Potential Using Watermark 200SS Sensors. *Advances in Internet of Things* 7: 71-86.
- Périard Y., Caron J., Jutras S., Lafond J. A., Houlliot A. 2012. Irrigation management of romaine lettuce in histosols at two spatial scales: Water, energy, leaching and yield impacts. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 168: 171-188.
- SAS. 2002. Statistical Analysis System. The SAS System Release 9.0 for Windows, SAS Institute.
- Shock C. C., Barnum J. M., Seddigh M. 1998. Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management. *In: Proceedings of the International Irrigation Show, San Diego*. pp. 139-146.
- Shock C. C., Wang F. X. 2011. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. *HortScience* 46: 178-185.
- Soulis K. X., Elmaloglou S., Dercas N. 2015. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. *Agricultural Water Management* 148: 258-268.
- Spaans E. J. A., Baker J. M. 1992. Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. *Plant and Soil* 143: 213-217.
- Srbinska M., Gavrovski C., Dimcev V., Krkoleva A., Borozan V. 2015. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production* 88: 297-307.
- Suresh A., Raju S. S. 2014. Poverty and Sustainability Implications of Groundwater Based Irrigation: Insights from Indian Experience. *Economic Affairs* 59: 311-320.

- Thompson R. B., Gallardo M., Agüera T., Valdez L. C., Fernández M. D. 2006. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science* 24: 185-202.
- Thompson R. B., Gallardo M., Valdez L. C., Fernández M. D. 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agricultural Water Management* 88: 147-158.
- Vellidis G., Tucker M., Perry C., Kvein C., Bednarz C. 2008. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 61: 44-50.
- Wu X., Zhang W., Liu W., Zuo Q., Shi J., Yan X., Zhang H., Xue X., Wang L., Zhang M., Ben-Gal A. 2017. Root-weighted soil water status for plant water deficit index based irrigation scheduling. *Agricultural Water Management* 189: 137-147.
- Zermeño-González A., García-Delgado M. A., Castro-Meza B. I., Rodríguez-Rodríguez H. 2007. Tensión de humedad del suelo y rendimiento de fruto de limón italiano. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 295-303.

