

HACIA UNA ÓPTIMA GESTIÓN DEL RIEGO A NIVEL DE PARCELA: EVALUACIÓN DE SENSORES COMERCIALES DE POTENCIAL HÍDRICO

A. Aldaz-Lusarreta^{1,2*}, M.A. Campo-Bescós^{1,2}, R. Giménez^{1,2}, I. Virto^{1,3} y N. Barberena²

¹Instituto de Innovación y Sostenibilidad en la Cadena Agroalimentaria (IS-FOOD), Universidad Pública de Navarra (UPNA), Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, España.

²Departamento de Ingeniería, Ed. Los Olivos, Universidad Pública de Navarra (UPNA), Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, España.

³Departamento de Ciencias, Ed. Los Olivos, Universidad Pública de Navarra (UPNA), Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, España.

*A. Aldaz-Lusarreta. alaitz.aldaz@unavarra.es

RESUMEN. Se presenta un avance, bajo condiciones de laboratorio, de resultados de una exhaustiva evaluación de sensores comerciales de potencial hídrico representativos de la población existente, a nivel nacional e internacional. Se seleccionaron 10 tipos de sensores clasificados en cuatro familias según su principio de funcionamiento (capacitivos, bloques de resistencia eléctrica, tensiómetros y sensores de disipación de calor). Se evaluaron en un suelo franco arcillo limoso. Durante la experimentación se varió el contenido de humedad desde saturación hasta 200 kPa; a razón de 1,5 L·m⁻³·h⁻¹.

La precisión y dispersión de valores de los sensores fue diferente según el rango de succión. En el rango de interés agronómico (20-100 kPa) los sensores de disipación de calor, capacitivos y dos de los tensiómetros seleccionados fueron los más precisos. En los dos primeros grupos, los registros podrían extenderse hasta 150-200 kPa, resultando particularmente interesante para la investigación científica.

ABSTRACT. A preview of the results, under laboratory conditions, of an exhaustive evaluation of commercial water potential sensors representative of the existing population, at national and international level, is presented. Ten sensor prototypes classified in four families according to their operating principle (capacitive, electrical resistance blocks, tensiometers and heat dissipation sensors) were selected. They were evaluated in silty clay loam soil. During the experiment the moisture content was varied from saturation to 200 kPa; at a rate of 1.5 L·m⁻³·h⁻¹.

The precision and dispersion of sensor values were different according to the suction range. In the range of agronomic interest (20-100 kPa), heat dissipation sensors, capacitive sensors and two of the selected tensiometers were the most accurate. In the first two groups, the records could be extended up to 150-200 kPa, being particularly interesting for scientific research.

Para tal fin, se emplean diferentes estrategias de riego (determinación del momento de efectuar el riego y la cantidad de agua que se debe aplicar). Generalmente, se utiliza el balance hídrico, el cual permite predecir la cantidad de agua que va a consumir la planta (evapotranspiración) y la cantidad de agua disponible en el suelo, es decir, el agua fácilmente utilizable por la planta. La principal limitación de esta técnica es que los valores de evapotranspiración son promedios de la zona, lo que hace que este tipo de estrategia de riego no deje de ser una mera estimación. Por otro lado, existe otro tipo de estrategia de riego basada en el uso de sensores volumétricos de humedad y tensiómetros (sensores de potencial hídrico). La diferencia con respecto al balance hídrico reside en que las mediciones se hacen in situ y en tiempo real. Mediante la aplicación de ambos dispositivos es posible entonces medir de manera continua tanto el contenido de agua en el suelo como su disponibilidad (succión o grado de retención en la matriz del suelo) para los cultivos; permitiendo realizar una gestión integral del riego (Mzezewa et al., 2011; Kizito et al., 2008).

Los suelos están compuestos de partículas minerales (arena, limo y arcilla) y de elementos orgánicos de diferente tamaño y forma. La proporción de cada una de éstas define la textura del suelo. A su vez, estas partículas suelen presentarse agrupadas en agregados, igualmente de variado tamaño y forma, conformando la estructura del suelo. La textura y estructura, propia de cada suelo, define su porosidad. El suelo es, en definitiva, un material poroso, complejo. La característica del sistema poroso del suelo, especialmente el tamaño (diámetro equivalente) y la forma de los poros dominantes, determina la capacidad del suelo de absorber, infiltrar y almacenar el agua (Hillel, 1998; Porta et al., 1994; Rojo et al., 1992). En el arte del riego no basta entonces conocer el contenido de agua del suelo per se, sino también la disponibilidad de la misma para las plantas; determinada entonces por la capacidad de las raíces de extraer el agua del suelo venciendo las fuerzas de retención (succión) de la misma (Or et al., 2005). Ambos parámetros (contenido de humedad y succión) se relacionan a través de la conocida curva de retención de humedad del suelo (CRH) (Nolz et al., 2013). Por lo expuesto, cada tipo de suelo presentará una determinada CRH ya que la misma estará condicionada por la textura, estructura y contenido de materia orgánica presente en el suelo.

1.- Introducción

Una adecuada práctica del riego en sus diferentes modalidades –superficie, aspersión y localizado– consiste básicamente en aplicar al suelo la cantidad de agua óptima, en el momento oportuno, para que la misma pueda ser aprovechada por las plantas.

Además, la forma de la CRH puede ser ligeramente diferente según la misma se obtenga en absorción o desorción (fenómeno de histéresis) (Hillel, 1998).

Hasta donde sabemos, no se ha realizado hasta la fecha una evaluación de la mayoría de dispositivos de potencial hídrico disponibles en el mercado actual.

El objetivo del presente trabajo es realizar una exhaustiva evaluación de sensores comerciales de potencial hídrico representativos de la población existente, tanto a nivel nacional como internacional, bajo condiciones de laboratorio. Se busca, principalmente, dar respuesta a las siguientes preguntas: (i) ¿Cuál de todos los sensores disponibles en el mercado es el más preciso? y (ii) ¿Cuál es la mínima tasa de cambio del contenido de humedad del suelo requerida por el sensor para una correcta lectura?

Tras haber llevado a cabo una exhaustiva búsqueda bibliográfica sobre sensores de potencial hídrico, se ha visto que en el mercado actual existe una amplia gama de dispositivos. Por tanto, se ha creído necesario realizar una clasificación tentativa de sensores en uso y poder así, trabajar con un número manejable de los mismos. Bittelli (2010) propone clasificar las familias o métodos según funcionamiento, área de aplicación o métodos de campo y de laboratorio. En el presente ensayo, se ha decidido clasificar los sensores de acuerdo a su principio de funcionamiento, agrupándolos en cuatro grandes familias; (i) tensiómetros, (ii) sensores capacitivos, (iii) sensores de disipación de calor y (iv) bloques de resistencia. Se seleccionaron 10 modelos de sensores (representativos de la población existente a nivel nacional e internacional) de tal manera que cada una de las 4 familias de sensores quedase representada por al menos uno de los mismos. La evaluación de los mismos se realizará en dos suelos contrastantes en su textura: franco arcillo limoso y limoso.

2.- Material y métodos

2.1. Sensores de potencial hídrico

Tal y como se ha mencionado, los sensores seleccionados para la presente investigación pertenecen a cuatro grandes familias cuya descripción y principio de funcionamiento se explican brevemente a continuación (Tabla 1).

Tensiómetros. El dispositivo consta de un depósito que se llena de agua, una cápsula porosa de cerámica y un vacuómetro. Cuando el tensiómetro se ha instalado a la profundidad deseada, la energía del agua en el interior del tensiómetro se equilibra con la del suelo que le rodea. Conforme se va secando el suelo, éste extrae más agua del tensiómetro a través de la cápsula porosa; generándose en el interior del depósito una presión negativa (vacío) medida por el vacuómetro (Lekshmi et al., 2014; Bitelli, 2010; Hillel, 1998).

Sensores capacitivos. Están compuestos por una cerámica porosa cuya relación humedad vs potencial hídrico es conocida. En el interior de la cerámica se aloja un sensor que mide el contenido de agua de la

misma. Cuando el sensor se coloca en el suelo, la succión en la cerámica porosa se equilibra con la matriz del suelo circundante. De esta manera, se mide el contenido de humedad de la cerámica y mediante la curva de calibración (relación humedad vs potencial hídrico) se infiere la succión. (Lekshmi et al., 2014; Bitelli, 2010; Robinson et al., 2008; Hillel, 1998).

Sensores de disipación de calor. Consisten en un elemento calefactor y un termopar colocados en el interior de una matriz cerámica porosa. Se envía un pulso de corriente eléctrica y el termopar mide el aumento de temperatura. La magnitud del aumento de temperatura varía según la cantidad de agua en la cerámica porosa, que cambia a medida que el suelo se humedece y se seca. El potencial hídrico del suelo se determina aplicando una ecuación de regresión (Lekshmi et al., 2014; Bitelli, 2010; Robinson et al., 2008; Hillel, 1998).

Bloques de resistencia. Están formados por un par de electrodos incrustados en un bloque poroso, que se entierra. La resistencia eléctrica entre los electrodos del bloque poroso es proporcional a su contenido de agua, que está a su vez, relacionado con el potencial hídrico del suelo circundante. Conforme se seca el suelo, y por tanto el bloque poroso, la resistencia eléctrica se reduce (Lekshmi et al., 2014; Campbell y Campbell, 2005; Hillel, 1998).

Así pues, se seleccionaron 10 modelos de sensores de tal manera que cada una de las 4 familias de sensores quedase representada por al menos uno de los mismos (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación, modelo y rango de medición de cada sensor comercial de potencial hídrico evaluado en la experimentación.

| Clasificación | Modelo | Rango de medición |
|-------------------------------|---|-------------------|
| Tensiómetro | Modelo SR (<i>IRROMETER Soil Water Management</i>) | 0 - 100 kPa |
| | Modelo LT (<i>IRROMETER Soil Water Management</i>) | 0 - 40 kPa |
| | Tensio 153e (<i>UGT Team</i>) | 0 - 100 kPa |
| | Teros 32 (<i>Meter Group</i>) | 0 - 85 kPa |
| Sensor capacitivo | TensioMark (<i>Stevens Water Monitoring Systems</i>) | 1 - 1.000.000 kPa |
| | Teros 21 (<i>Meter Group</i>) | 9 - 2.000 kPa |
| | Teros 21 Gen 2 (<i>Meter Group</i>) | 5 - 100.000 kPa |
| Sensor de disipación de calor | EQ-3 (<i>Delta-T Devices</i>) | 0 - 1000 kPa |
| | 229-L (<i>Campbell Scientific, Inc.</i>) | 0 - 2.500 kPa |
| Bloque de resistencia | Watermark Modelo 200SS (<i>IRROMETER Soil Water Management</i>) | 0 - 200 kPa |

2.2. Suelos

Los sensores fueron evaluados en dos suelos contrastantes en cuanto a su textura, principalmente (Tabla 2). Ambos suelos se han tamizado a 2 mm.

Tabla 2. Propiedades físico-químicas de los dos suelos utilizados en la experimentación.

| | Suelo 1 | Suelo 2 |
|--|------------------------------|---------------|
| Arena (Gruesa) (%) | 14,5 | 17,3 |
| Arena (Fina) (%) | 21,8 | 29,3 |
| Limo (%) | 39,4 | 39,4 |
| Arcilla (%) | 31,7 | 14,0 |
| Textura (USDA) | <i>Franco arcillo limoso</i> | <i>Limoso</i> |
| pH | 8,1 | 7,7 |
| CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | 176,0 | 484,0 |
| Contenido orgánico (%) | 2,0 | 1,9 |
| Carbonatos (%) | 20,6 | 40,3 |
| CIC ($\text{Cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$) | 1,7 | 1,1 |

Cabe destacar que, los suelos dominantes de Navarra son de clases texturales finas, siendo el *Suelo 2* (Tabla 2) atípico en esta región.

Tratamientos y repeticiones. De la combinación de 10 sensores y 2 suelos se definen 20 tratamientos; a los que se suma el tratamiento control (ver abajo). Los experimentos –combinación de sensores y suelos– se repitieron dos veces; cada repetición con una unidad de sensor diferente.

2.3. Experimentación

La evaluación de cada uno de los sensores comerciales se ha realizado en laboratorio en un volumen de suelo (densidad aparente: $1,16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), contenido en un cilindro mallado de acero inoxidable (Fig. 1), en cuyo centro se alojaba el sensor. En la elección de este contenedor se han tenido en cuenta los siguientes criterios técnicos y operativos.

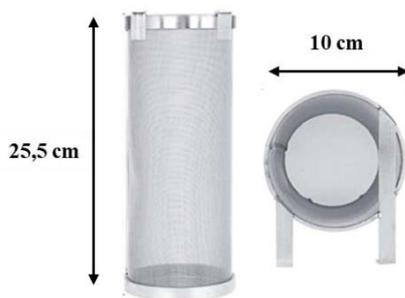


Fig. 1. Dimensiones del cilindro mallado de acero inoxidable utilizado para la evaluación de los sensores.

Se trata de un recipiente mallado para que la demanda evaporativa fuese homogénea en toda su superficie, asegurando así una variación uniforme en el contenido de humedad del suelo durante la experimentación (ver abajo). Una mayor homogeneidad en el contenido hídrico es posible gracias a la forma cilíndrica del recipiente, puesto que la distancia desde su centro (donde se encuentra el sensor) a cualquier punto de su periferia es constante.

Además, para la elección de las dimensiones del cilindro (Fig. 1) se tuvo en cuenta las dimensiones de los sensores y su radio de acción (aproximadamente entre 2 y 3 cm).

Determinación de valores de referencias (tratamiento control). Para poder comparar las lecturas que registraban los sensores durante la experimentación (ver abajo), era menester establecer valores de succión de referencia a diferentes contenidos de humedad, en ambos suelos; es decir, determinar, para cada suelo, su correspondiente CRH en desorción. Luego, durante la experimentación, para estimar el valor de la succión en el suelo, en un momento determinado, bastaría medir el contenido de humedad del mismo para, a través de éste, conocer el valor de succión.

Las CRH de cada suelo fueron determinadas mediante el uso de Placas de Presión de Richard, ya que se trata de un método más o menos directo –y relativamente sencillo y poco costoso considerando los recursos disponibles– para medir la succión a diferentes grados de humedad. Mediante el uso de estas placas de presión, es posible aplicar presión positiva directamente sobre las muestras de suelo; a diferencia de lo que sucede en los sensores comerciales donde la lectura de la succión se veía, de alguna manera afectada o condicionada por la presencia de un determinado material poroso sintético –propio del sensor– en contacto íntimo con el suelo. Un claro ejemplo de esto último es la capsula de porcelana porosa de los tensiómetros que condiciona –debido a su permeabilidad– el movimiento de agua desde el depósito de agua hacia el suelo. Cabe recordar que la placa porosa en la olla de Richard, es básicamente un mero sostén de las muestras de suelo; y que garantiza, además, que se mantenga un continuo drenaje de agua de la muestra de suelo, durante el proceso de medición.

El principio de funcionamiento de esta técnica se basa, entonces, en la inyección de aire comprimido a una presión equivalente al potencial hídrico a determinar. Al aplicar la presión, la placa cerámica deja drenar el agua extraída de las muestras a través de un colector hasta alcanzar el estado de equilibrio (las muestras dejan de drenar). El proceso finaliza con el pesado de las muestras y su posterior secado. De esta forma, y por diferencia de pesos se consigue determinar el contenido hídrico de la muestra (Dirksen, 1999).

El suelo para la determinación de las CRH fue tamizado a 2 mm y compactado a una densidad aparente de $1,16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, al igual que se hizo con el suelo de relleno de los cilindros experimentales (ver arriba). Además, la CRH para los dos suelos de estudio se ha definido desde 0 hasta 200 kPa ya que es el rango de interés a nivel agronómico (ej., con fines de riego). El agua fácilmente utilizable por la planta se encuentra en succiones inferiores a los 100-150 kPa y, además, la mayoría de los sensores convencionales (especialmente los tensiómetros) cavitan a los 100 kPa.

Diseño experimental. Cada experimento se llevó a cabo dentro de una amplia cámara climática donde se alojaban los diferentes tratamientos (Fig. 2); es decir, 10 cilindros mallados, cada uno conteniendo un suelo y un sensor determinado.

En cada caso, el suelo se llevaba a saturación (por capilaridad). A continuación, se forzaba su secado bajo condiciones controladas (desorción). El secado se llevaba a cabo en la cámara donde se podía controlar tanto la humedad como la temperatura ambiente para así establecer una tasa de velocidad de secado determinada. Siendo que cada sensor tiene un determinado tiempo de respuesta (no indicado por el fabricante) el tiempo de secado se ajustó al que cabría esperar en los estratos superiores de un suelo agrícola in situ. La tasa de secado que cabría esperar en los primeros 10 cm del perfil de suelo en condiciones de campo con un cultivo de maíz en un mes de alta evapotranspiración es de $1,5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (Gomes de Andrade et al., 2011). Pruebas preliminares permitieron determinar que esta tasa de variación del contenido de humedad se alcanzaba, aproximadamente, con una humedad relativa del 80 % y una temperatura de 10 °C.

Dentro de la cámara climática, el sensor de cada tratamiento, estaba conectado a un datalogger –CR1000X de Campbell Scientific– que permitía un registro automático de datos durante toda la experimentación.

La cámara alojaba también un cilindro sólo con suelo (tratamiento control, ver arriba) sometido a las mismas condiciones de secado que el resto de tratamientos. Por diferencias de pesada (precisión de 0,01 g) de este cilindro, era posible conocer el contenido de humedad del suelo en un determinado momento. Y con este dato, inferir el valor de succión correspondiente (valor de referencia, ver arriba) a través de la CRH del suelo en cuestión.



Fig. 2. Imagen de los tratamientos alojados en el interior de la cámara climática durante la experimentación.

Protocolo experimental. La experimentación se iniciaba con el suelo saturado (0 kPa). Cada hora, aproximadamente, se anotaba el valor de succión registrado por cada sensor y el peso del tratamiento control para la determinación del contenido de humedad. Todo esto hasta alcanzar aproximadamente los 200 kPa.

3.- Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados preliminares de esta investigación correspondientes al Suelo 1 (Tabla 2).

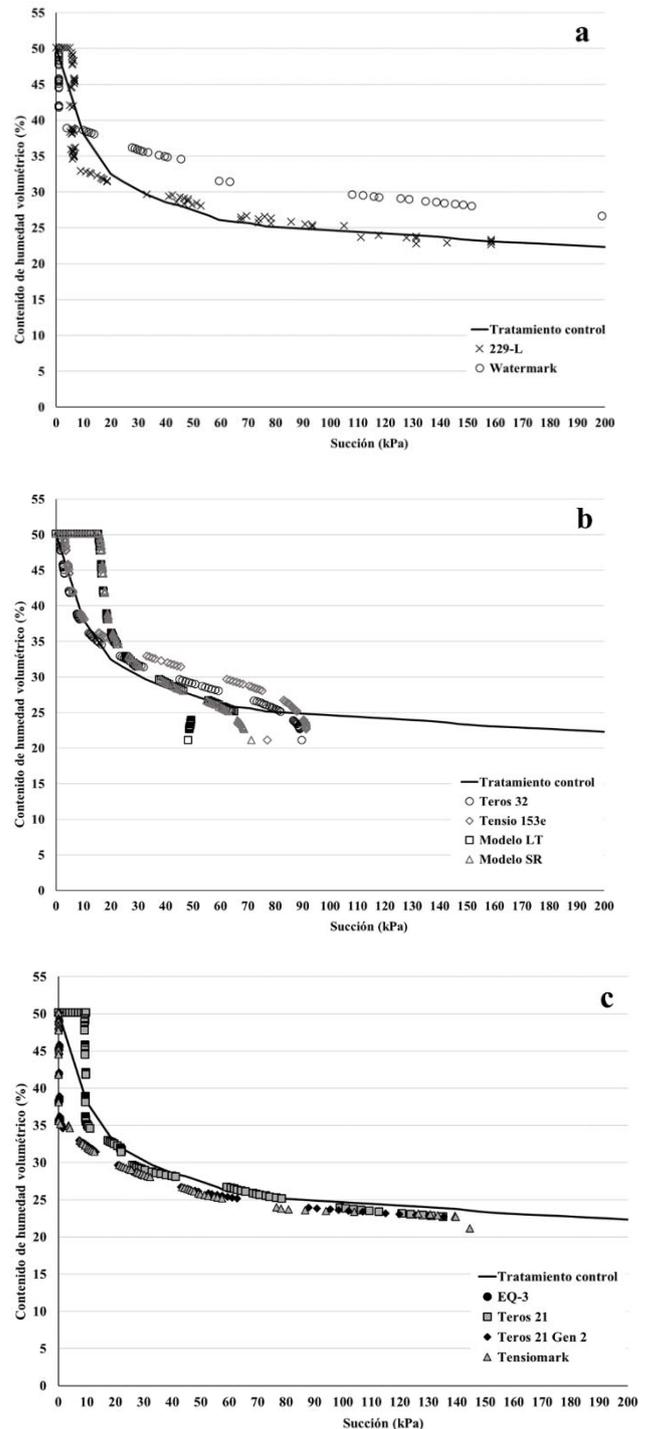


Fig. 3. Curvas de retención de humedad del tratamiento control y de las distintas familias de sensores: a) sensor de disipación de calor (229-L) y del bloque de resistencia (Watermark), b) tensiómetros (Teros 32, Tensio 153e, Modelo LT y Modelo SR) y c) sensores capacitivos (EQ-3, Teros 21, Teros 21 Gen2 y Tensiomark).

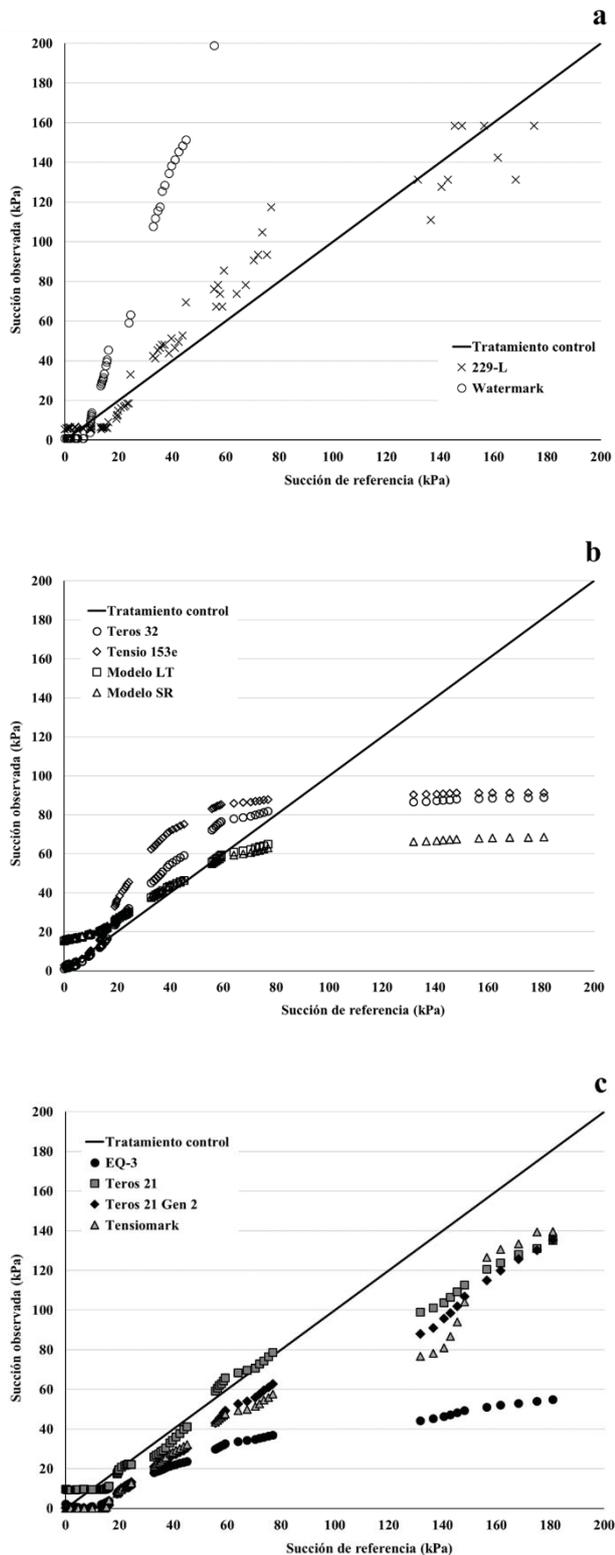


Fig. 4. Succión de referencia del tratamiento control frente a la succión observada en las diferentes familias de sensores. a) sensor de disipación de calor (229-L) y el bloque de resistencia (Watermark), b) tensiómetros (Teros 32, Tensio 153e, Modelo LT y Modelo SR) y c) sensores capacitivos (EQ-3, Teros 21, Teros 21 Gen2 y Tensiomark).

En la Fig. 3 se muestran las curvas de retención obtenidas con los diferentes sensores junto a la de referencia (tratamiento control). Las diferentes curvas guardan un cierto paralelismo con la curva de referencia, principalmente las correspondientes a los sensores de disipación de calor y los capacitivos (Fig. 3a y 3c). De hecho, las curvas de estas dos familias prácticamente se superponen con la curva de referencia en el rango de succiones de 20 kPa a 150 kPa. Los tensiómetros –especialmente los modelos LT y SR– (Fig. 3b) muestran un comportamiento similar al que se acaba de describir, pero el registro se interrumpe –por cavitación– a succiones de 70-90 kPa.

A excepción de los tensiómetros Teros 32 y Tensio 153e (Fig. 3b), a succiones inferiores a 20 kPa (agua gravitante) se observa, en las respectivas CRH, una marcada zona de entrada de aire; es decir donde el valor del contenido de humedad se mantiene en saturación dentro de ese rango de succión. Esto debido a la presencia de una población más o menos elevada de poros ocluidos o no funcionales en la matriz porosa de los respectivos sensores, a estas bajas succiones. Por el contrario, el bloque de resistencia y los capacitivos –a excepción del Teros 21– no sólo no presentan una zona de entrada de aire sino que incluso registran una abrupta caída del contenido de humedad a muy bajas succiones (inferiores a 5 kPa); lo que sugiere la existencia de una población de poros funcionales y de gran tamaño.

Una manera más clara de analizar el comportamiento de cada sensor es comparar –para diferentes contenidos de humedad– el valor de succión medido por el dispositivo (succión observada) con respecto al correspondiente valor de referencia (Fig. 4).

En general, la respuesta de las distintas familias de sensores fue diferente según el rango de succión (Fig. 4).

Los tensiómetros muestran poca o nula sensibilidad a succiones superiores a aproximadamente 100 kPa (Fig. 4b) cuando se produce la cavitación de los mismos (ver arriba); mientras que los restantes (capacitivos, disipación de calor y bloque de resistencia) son insensibles en succiones inferiores a 20 kPa (Fig. 4a y 4c).

Si bien el sensor de disipación de calor y sobre todo los capacitivos, a diferencia de los tensiómetros, son sensibles a succiones superiores a 100 kPa, subestiman la succión en más de un 15-20 % (Fig. 4c).

Por otro lado, entre los 20 y los 100 kPa los sensores capacitivos subestimaron la succión (Fig. 4b); exceptuando los modelos Teros 21 y Teros 21 Gen 2, con una buena estimación de la misma (Índice de Nash Sutcliffe= 0,85 y 0,70, respectivamente). Por el contrario, tanto los tensiómetros, como el sensor de disipación de calor y especialmente el bloque de resistencia sobreestimaron los registros de succión.

4.- Conclusiones

Los principales sensores de potencial hídrico en uso a nivel internacional fueron evaluados en condiciones de laboratorio; en un suelo agrícola típico de Navarra. Previamente, el gran número de sensores existentes en el mercado fue clasificado según principios de funcionamiento definidos con criterios propios: (i) tensiómetros, (ii) capacitivos, (ii) de disipación de calor y (iv) bloque de resistencia.

La respuesta en cuanto a precisión y dispersión de valores de los diferentes grupos o familias de sensores fue diferente según el rango de succión considerado.

En el rango de succión de interés agronómico -20 kPa y 100 kPa: que corresponde al agua fácilmente utilizable por las plantas— tanto los sensores de disipación de calor como los capacitivos y dos modelos de tensiómetros se presentan como los más precisos. Además, en los dos primeros grupos, los registros podrían extenderse hasta al menos $150-200$ kPa, aproximadamente con la misma fiabilidad. Esta última cualidad resulta particularmente interesante para la investigación científica.

Algunos sensores, sobre todo el de bloque de resistencia, podrían mejorar grandemente su actuación con modelos de ajustes ad hoc, en lugar de los generales proporcionados por el fabricante.

Esta primera evaluación debe completarse mediante un análisis estadístico más detallado, de tal manera de cuantificar mejor la precisión y error experimental de cada grupo de sensores; y esto en diferentes rangos de succión. Esto último permitiría al usuario elegir el sensor más adecuado según sus objetivos; por ej., con fines de riego o investigación en hidrología subsuperficial.

Resta cuantificar el mínimo tiempo de lectura (tiempo de respuesta) requerido por cada sensor para una correcta lectura. Por ejemplo, un sensor que necesita que el contenido de humedad se mantenga constante un largo tiempo para generar una lectura fiable, no sería apto para su uso en horizontes superficiales de suelo sometidos a una alta tasa evapotranspirativa.

Nueva experimentación con suelos de texturas contrastantes permitirá analizar el efecto de esta propiedad (este factor), en la relación contenido de humedad vs succión.

Una evaluación más precisa que la presente podría llevarse a cabo usando como valores de referencia (valores de succión para diferentes contenidos de humedad) obtenidos a partir de células de tempe en lugar de curvas de retención de humedad obtenidos con ollas de presión.

Agradecimientos. La presente investigación se ha llevado a cabo en el marco del proyecto 011-1365-2020-000075 CropStick: sentinel de sales, pH, Nitrógeno y nutrientes y la percolación de agua en profundidad, financiado por el Gobierno de Navarra.

5.- Bibliografía

- Bittelli, M., 2010. Measuring soil water potential for water management in agriculture: a review. *Sustainability*, 2 (5) (2010), pp. 1226-1251.
- Campbell, G.S. y C.S. Campbell, 2005. Water content and potential, measurement. En D., Hillel y J.L., Hatfield. (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment (Vol. 3)* (pp. 253-257). Amsterdam: Elsevier.
- Dirksen, C., 1999. *Soil physics measurements*. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 154 p.
- Gomes de Andrade, J., P. Seguí, R. Carlesso, C. Trois y A.E. Knies, 2011. Pérdidas de agua por evaporación en maíz con siembra convencional y directa para diferentes niveles de cobertura muerta. I. resultados experimentales. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2), 60-64.
- Hillel, D., 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego., CA.
- Kizito, F., C.S. Campbell, G.S. Campbell, D.R. Cobos, B.L. Teare, B. Carter, y J.W. Hopmans, 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352(3-4), 367-378.
- Lekshmi, S., U. Susha, D.N. Singh, y M. Shojaei Baghini, 2014. A Critical Review of Soil Moisture Measurement. *Measurement*, 54: 92-105.
- Mzezewa, J., E.T. Gwata, y L.D. van Rensburg, 2011. Yield and seasonal water productivity of sunflower as affected by tillage and cropping systems under dryland conditions in the Limpopo Province of South Africa. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1641-1648.
- Nolz, R., G. Kammerer, y P. Cepuder, 2013. Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. *Agricultural Water Management*, 116, 12-20.
- Or, D., M. Tuller, y J.M. Wraith, 2005. Water Potential. En D., Hillel y J.L., Hatfield. (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment (Vol. 3)* (pp. 270-277). Amsterdam: Elsevier.
- Porta, J., M. López-Acevedo, y C. Roquero, 1994. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Mundi-Prensa.
- Robinson, D. A., C.S. Campbell, J.W. Hopmans, B.K. Hornbuckle, S.B. Jones, R. Knight, y O. Wendroth, 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358-389.
- Rojo, C., P. Urbano, y A. Wild, 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi-Prensa.