EFECTO DE LA SALINIDAD EN LAS MEDIDAS DE LA HUMEDAD DEL SUELO REALIZADAS CON UN SENSOR DE CAPACITANCIA EN CULTIVOS HORTÍCOLAS.

Fernández Fernández M.D.[1] (P), Thompson R.B.[2], Gallardo Pino M.[2], Gázquez Garrido J.C.[1]

RESUMEN

Este trabajo evalúa el efecto de la salinidad del suelo en las medidas de la humedad del suelo realizadas con un sensor de capacitancia en cultivos hortícolas, en los que los nutrientes se aplican con sistemas de fertirrigación. En estos sistemas de cultivo es una práctica habitual variar la conductividad eléctrica (CE) de la solución de fertirriego para aumentar el contenido de azúcares del fruto o reducir el vigor de la planta, inducir un mayor crecimiento generativo y frenar el crecimiento vegetativo. Por tanto, en este contexto es importante caracterizar el comportamiento de los sensores de capacitancia para la medida de la humedad del suelo bajo situaciones de salinidad elevada o cambios bruscos en la salinidad del suelo. Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar los efectos de los cambios en la salinidad del suelo en la medida de la humedad volumétrica realizadas con sensores de capacitancia, y ii) evaluar si la normalización de estos sensores con una solución salina reducen los efectos de la salinidad sobre las medidas de la humedad volumétrica.

Los resultados de este trabajo han puesto de manifiesto que el sensor de capacitancia fue muy sensible a la salinidad del suelo. Cuando se aplicó el mismo volumen de agua de riego pero con distinta salinidad, se registraron apreciables diferencias en el contenido volumétrico de agua en el suelo, sin embargo, el contenido de agua real en los tratamientos fue similar como indican los valores de potencial. La sensibilidad a la salinidad queda resaltada por la rápida y gran reducción en las medidas del contenido de agua del suelo con la aplicación de volúmenes de riego importantes para el lavado de sales. La disminución en la humedad volumétrica y CE_{ss} en el tratamiento control, mientras que el potencial matricial permanecía constante y alto, indica que los sensores de capacitancia fueron sensibles incluso a valores de salinidad relativamente bajos.

La normalización de los sensores de capacitancia con una solución salina (5 dS m^{-1}) no eliminó el error inducido por niveles de salinidad del suelo moderados frente a la normalización con una solución de 2 dS m^{-1} de CE.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las especies hortícolas tienen un desarrollo radicular superficial y son sensibles a estrés hídrico moderado (Sammis, 1980). Esto, no es desconocido por los agricultores que aplican el riego frecuentemente, y el manejo del riego exige que sea más preciso. El uso de sensores para el seguimiento del estado hídrico del suelo ofrece la posibilidad de manejar el riego de acuerdo a las características particulares de cada suelo y cultivo. En los últimos años, se han desarrollado sensores para la medida del contenido volumétrico de agua del suelo basados en medidas de capacitancia (Starr y Paltineanu, 2002). El equipo EnviroSCAN (Sentek Sensor, Technologies, Stepney, South Australia, Australia) es el ha tenido más éxito en aplicaciones comerciales para la programación de riego (Fares y Polyakov, 2006) e investigación (Starr y Paltineanu, 1998, Fares y Alva,

[1] Estación Experimental de la Fundación Cajamar. Autovía del Mediterráneo, km 416,7. 04710 El Ejido (Almería). E-mail: mdfernandez@cajamar.es. www.fundacioncajamar.es

[2] Universidad de Almería, Departamento de Producción Vegetal. La Cañada de San Urbano s/n. Almería.

2000). Existen trabajos realizados en laboratorio que muestran como las medidas realizadas con el EnviroSCAN están afectadas por un incremento de la salinidad (Mead et al., 1995; Baumhardt et al., 2000; Kelleners et al., 2004). Mead et al., (1995) señalaron que una conductividad eléctrica del extracto saturado (CE_e) de 3.4 dS m^{-1} (después de aplicar una solución salina de 5 dS m^{-1}) producen una sobrestimación del 10% en el contenido volumétrico del agua del suelo. En este trabajo se indica que la normalización de los sensores con la solución salina elimina o reduce la sobrestimación. Existen pocos trabajos sobre el efecto de la salinidad sobre las sondas de capacitancia bajo condiciones de cultivo y la mayoría de los ensayos se han realizado en laboratorio.

En el caso de cultivos hortícolas, en los que los nutrientes se aplican con sistemas de fertirrigación, es frecuente alcanzar en ciertos momentos del ciclo niveles elevados de conductividad eléctrica (CE) en el suelo o variaciones de estos niveles debido a prácticas de manejo intencionadas que suelen ser frecuentes en el manejo de estos cultivos. Así, en cultivo de melón o tomate, la CE se incrementa para aumentar el contenido de azúcares del fruto o reducir el vigor de la planta para inducir crecimiento generativo y frenar el crecimiento vegetativo. Por tanto, en este contexto es importante caracterizar el comportamiento de los sensores de capacitancia para la medida de la humedad del suelo bajo situaciones de salinidad elevada o cambios bruscos en la salinidad del suelo.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar los efectos de los cambios en la salinidad del suelo en la medida de la humedad volumétrica realizadas con sensores de capacitancia (EnviroSCAN), y ii) evaluar si la normalización de estos sensores con una solución salina reducen los efectos de la salinidad sobre las medidas de la humedad volumétrica.

MATERIAL Y METODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en un invernadero de plástico tipo parral de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar (Las Palmerillas), situada en El Ejido (Almería). El invernadero, con una superficie útil de 480 m^2, era asimétrico con estructura de tubo galvanizado.

El suelo del invernadero era un enarenado, realizado en mayo de 1996. Sobre el suelo original se aportó una capa de 0,30 m de tierra de cañada de textura franco-arcillosa. Sobre esta capa, se añadieron 7 Kg m^{-2} de estiércol incorporados al suelo con una labor de fresadora y otros 7 kg m^{-2} de estiércol en forma de capa de 0,02 m de espesor. Sobre el estiércol se aportó como acolchado una capa de arena de playa de 0,1 m de espesor.

El riego se aplicó con un sistema de riego por goteo, con una distancia de 1,5 m entre ramales y 0,5 m entre goteros. Para el fertirriego de las parcelas se instalaron dos tanques, con una capacidad de 200 L cada uno, en los que se prepararon las dos soluciones de fertirriego, y una bomba, que estaba conectada a una red de riego independiente de la que abastece al resto del invernadero. El coeficiente de uniformidad (C.U.) del sistema de riego fue del 95,4 % y un caudal medio de 2,5 L h^{-1}. El agua de riego tenía una conductividad eléctrica (CE) de 0,4 dS m^{-1}.

El cultivo de tomate (*Licopersicum sculentum* L.) var. Raf fue transplantado el 2/09/05 y el ciclo se extendió hasta el 16/03/06. Las plantas se entutoraron en torno a un hilo de rafia vertical atado a un alambre, situado a 2 metros de altura sobre el suelo. El manejo del cultivo se realizó según las prácticas habituales en la zona, como la eliminación de brotes laterales, deshojados y polinización con abejorros. Las líneas de cultivo estaban orientadas norte-sur, con una separación entre líneas de 1,5 m y 0,5 m entre plantas.

Tratamientos

Los efectos de la salinidad sobre los sensores de capacitancia EnviroSCAN (Sentek Sensor, Technologies, Stepney, South Australia, Australia) se han evaluado utilizando dos

soluciones de distinta conductividad eléctrica para el riego y la normalización de los sensores de capacitancia.

Antes de instalar los sensores de capacitancia se llevó a cabo su normalización, realizando medidas de frecuencia de cada sensor dentro del tubo de PVC, primero expuesto el tubo al aire (F_a) y, posteriormente, sumergiéndolo en un baño de agua (F_w). Con estas medidas se determinó la frecuencia normalizada (FN) mediante la ecuación 1:

$$FN = \frac{(F_a - F_s)}{(F_a - F_w)} \qquad (1)$$

F_s era la frecuencia medida en el tubo de acceso una vez instalado en el suelo.

Se aplicó una calibración específica para este tipo de suelo (Fernández et al., 2004).

Se han estudiado tres tratamientos:

1. **Control**: regado y normalizado con una solución de CE de 2 dS m^{-1}, que es una solución de fertirriego estándar que se aplica en los cultivos de la zona en el período de plena producción (Tabla I).
2. **Salino N-2**: se regó con una solución de fertirriego salina (CE=5 dS m^{-1}) y los sensores fueron normalizados con la solución de fertirriego del tratamiento control (CE=2 dS m^{-1}).
3. **Salino N-5**: los sensores fueron normalizados y el cultivo fue regado con una solución salina (CE=5 dS m^{-1}).

Las soluciones salinas para la normalización y el riego se obtuvieron adicionando 1,84 g de ClNa por litro a la solución de fertirriego estándar (Tabla I). Los tres tratamientos recibieron igual volumen de agua en cada riego, y se calculó en base a la ETc estimada (Orgaz et al. 2005).

Los tratamientos se aplicaron siguiendo un diseño completamente aleatorio, con 3 tratamientos y 3 repeticiones por tratamiento. Cada parcela estaba compuesta por 6 plantas, con una superficie por parcela de 4 m^2.

Con el fin de homogeneizar las condiciones de salinidad en todas las parcelas, se aplicaron varios riegos de lavado (CE=0,4 dS m^{-1}), aportándose unos 33 mm de agua. Posteriormente, todas las parcelas se regaron con la solución de fertirriego estándar (Tabla I) y con volúmenes superiores a las necesidades del cultivo. Los distintos tratamientos de salinidad se aplicaron desde el día 11/01/06 hasta el 16/02/06. Desde el 17/02/06 hasta el 16/3/06 se aplicaron a todas las parcelas varios riegos de lavado con un volumen de unos 10 mm en cada riego (CE=0,4 dS m^{-1}).

Determinaciones

En cada repetición se instaló una sonda de capacitancia o FDR, tensiómetros y sondas de succión a 6 cm de separación del ramal portagoteros y a 8 cm de distancia del gotero medido longitudinalmente, estas distancias se tomaron en relación a la parte central de cada sensor.

El contenido de agua en el suelo se midió de forma continua cada 30 minutos con sondas de capacitancia (modelo EnviroSCAN, Sentek Sensor Technologies, Stepney, South Australia, Australia) a dos profundidades, a 5-15 cm y 15-25 cm de profundidad bajo la capa de arena

Diariamente se midió el potencial mátrico con tensiómetros manuales (modelo ISR-300, Irrometer, Co. Riverside, CA, USA) a dos profundidades, la cápsula cerámica estaba instalada a 10 y 20 cm de profundidad bajo la capa de arena. En cada parcela también se midió dos veces por semana la CE de la solución del suelo (CE_{ss}) extraída con sondas de succión instaladas la parte central de la cápsula cerámica a 10 y 20 cm de profundidad bajo la capa de arena. También se determinó la CE del extracto saturado (CE_e) de muestras tomadas a 5-15 cm y 15-25 cm de profundidad en las tres repeticiones del tratamiento

control y tres de las seis parcelas de los tratamientos salinos. La CE_e se determinó cuando la salinidad de la solución del suelo era máxima (17/2/06).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra la evolución de la CE de la solución de suelo (CE_{ss}), contenido volumétrico de agua del suelo y del potencial matricial a 10 cm de profundidad. La CE_{ss} antes de iniciar la aplicación de los tratamientos era similar en los tratamientos, con valores entre 1,8 y 2,2 dS m^{-1} (Figura 1a). Posteriormente, la aplicación de la solución de fertirriego salina (CE=5 dS m^{-1}) a los tratamientos salinos supuso un aumento en la CE_{ss}, apreciándose su efecto una semana después de iniciados los tratamientos. La CE_{ss} aumentó rápidamente hasta 4,6 dS m^{-1} el 31 de enero, después el incremento de salinidad fue más lento, alcanzándose valores máximos de 4,8-4,9 dS m^{-1} el 14 de febrero. La CE_{ss} del tratamiento control fue claramente inferior a la alcanzada en los tratamientos salinos, y llegó a alcanzar valores máximos de 2,9 dS m^{-1} . La aplicación de los riegos de lavado a partir del 17/02/06 provocó una importante disminución de la CE_{ss} en los tratamientos salinos y en menor medida en el tratamiento control, alcanzándose valores de 1,8, 1,2 y 1,0 dS m^{-1} en los tratamientos Salino N-2, Salino N-5 y control, respectivamente. Los valores de la CE del extracto saturado entre 5 y 15 cm de profundidad para los tratamientos control y salinos el 17 de febrero fueron de 1,8 y 3,2 dS m^{-1}, respectivamente.

A pesar de que los tres tratamientos recibieron el mismo volumen de riego, el contenido volumétrico de agua en el suelo o humedad volumétrica del suelo medida con los sensores de capacitancia mostró valores muy diferentes entre los tratamientos salinos y el tratamiento control (Figura 1b), y con una evolución similar a la evolución de la CE_{ss} (Figura 1a). Los valores iniciales de la humedad volumétrica en los tratamientos fueron muy similares. A partir del 11 de enero, con la aplicación de la solución de fertirriego salina (CE=5 dS m^{-1}) a los tratamientos salinos, la humedad del suelo aumentó rápidamente hasta el 29 de enero, posteriormente la tasa de incremento fue menor. La aplicación de los riegos de lavado (CE=0,4 dS m^{-1}) a partir del 17 de febrero provocaron una rápida e importante caída en la humedad del suelo en los tratamientos salinos. El máximo incremento en los valores de la humedad volumétrica del suelo, en relación al tratamiento control, que se atribuye a la aplicación de la solución salina (CE=5 dS m^{-1}) en los tratamientos Salino N-2 y Salino N-5, fue aproximadamente del 10%. En el tratamiento control, se produjo un ligero incremento en la humedad entre el 11 y el 30 de enero, y disminuyó entre el 31 de enero y el 17 de marzo, mostrando una evolución similar a los cambios en CE_{ss}.

El potencial matricial a 10 cm de profundidad fue muy similar en los tres tratamientos (Figura 1c), indicando que no hubo diferencias en la humedad del suelo entre los tres tratamientos. Durante el periodo desde el 17 de febrero hasta el 15 de marzo, se observó una rápida e importante reducción en la humedad volumétrica del suelo (Figura 1b) en los tratamientos Salino N-2 y Salino N-5, sin embargo el potencial matricial en los tres tratamientos se mantuvo constante y superior a –10 kPa (Fig), indicando que el suelo estaba húmedo y que no se produjo ese proceso de secado, ya que se aplicaron importantes volúmenes de riego para el lavado de sales.

La evolución de la CE_{ss}, contenido volumétrico de agua del suelo y potencial matricial a 20 cm de profundidad fue similar a la observada a 10 cm de profundidad (datos no presentados).

La evolución paralela mostrada por el contenido volumétrico de agua del suelo y la CE_{ss} indica que los sensores de capacitancia fueron sensibles a la salinidad. Dado que el suelo estuvo muy próximo a capacidad de campo, la CE_e puede estimarse como la mitad de la CE_{ss}. En el tratamiento control, la CE_e osciló entre valores máximos de 1,4 dS m^{-1} y 0,5 dS m^{-1} al final del periodo de lavado de suelo. La disminución en la humedad volumétrica y CE_{ss} en el tratamiento control, mientras que el potencial matricial permanecía constante y alto, durante el 14 de febrero y el 15 de marzo, indican que los sensores de capacitancia fueron sensibles incluso a valores de salinidad relativamente bajos. La sobrestimación en el

contenido volumétrico de agua es del 4% por cada 1 dS m^{-1} de incremento de la CE_{ss} bajo estas condiciones experimentales (Thompson et al., 2007).

Los resultados de trabajos en laboratorio también han puesto de manifiesto el efecto de la salinidad sobre la medida del contenido de agua del suelo realizada con sondas de capacitancia. Mead et al. (1995) y Baumhardt et al. (2000) observaron como las sondas de capacitancia sobrestimaban el contenido de agua del suelo después de aplicar una solución salina a columnas de suelo. Kellener et al. (2004) indicaron que un incremento en la conductividad iónica del medio reduce la frecuencia de oscilación medida por la sonda de capacitancia, por lo que se registran valores del contenido de agua del suelo mayores. Otro tipo de sensor de capacitancia, como el sensor ECH_2O (Decagon Devices, Pullman, WA, USA), también ha mostrado una gran sensibilidad a la variación en la CE de la solución entre 1 y 3 dS m^{-1} en un cultivo en sustrato (Nemali et al., 2007).

La normalización de los sensores de capacitancia con una solución salina de 5 dS m^{-1} (Salino N-5) frente a la normalización con una solución de 2 dS m^{-1} (Salino N-2) no tuvo efecto en la sobrestimación de la humedad volumétrica cuando se aplicó una solución de fertirriego salina. Mead et al. (1995) indicó que la normalización de los sensores de capacitancia con la solución salina eliminaba completamente el error inducido por niveles de salinidad del suelo moderada (CE_e=3,4 dS m^{-1}) y lo reducía apreciablemente en niveles más altos (CE_e de 7,7 y 15,4 dS m^{-1}).

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo han puesto de manifiesto que las medidas del contenido volumétrico de agua del suelo realizadas con un sensor de capacitancia fueron muy sensibles a la salinidad del suelo, incluso a valores de salinidad relativamente bajos.

La normalización de los sensores de capacitancia con una solución salina no eliminó la sobrestimación del contenido de volumétrico del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer la asistencia técnica prestada por Francisco Bretones de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar por su ayuda y asistencia en temas relacionados con la electrónica y electricidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baumhardt, R.L., R.J. Lascano, S.R. Evett. 2000. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1940–1946.

Fares, A., A.K. Alva. 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. Irrig. Sci. 19:57–64. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:311–318.

Fares, A., V. Polyakov. 2006. Advances in crop water management using capacitance sensors. Adv. Agron. 90:43–77.

Kelleners, T.J., R.W.O. Soppe, D.A. Robinson, M.G. Schaap, J.E. Ayars, T.H. Skagg. 2004. Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:430–439

Mead, R.M., J.E. Ayars, J. Liu. 1995. Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil water salinity on a capacitance probe calibration. ASAE Paper No. 95–3264. ASAE, St. Joseph, MI.

Nemali K.S., Montesano F., Dove S.K., M.W. van Iersel. 2007. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH_2O and Theta probes. Scientia Horticulturae, doi:10.1016/j.scientia.2006.12.013.

Orgaz, F., M.D. Fernández, S. Bonachela, M. Gallardo, E. Fereres. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agric. Water Manag. 72:81–96.

Sammis TW. 1980. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops. Agron. J. 72:701-704.

Starr, J.L., I.C. Paltineanu. 1998. Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:115–122.

Starr, J.L., I.C. Paltineanu. 2002. Capacitance devices. p. 463–474. *In* J.H. Dane and G.C. Topp (ed.), Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

Thompson, R.B., Gallardo M., Fernández M.D., Valdez L.C., Martínez-Gaitán C. 2007. Effect of salinity on soil moisture measurements made with a capacitance sensor Ander vegetable production conditions. Soil Science Society of America Journal (en prensa).

Tabla I: Composición de la solución de fertirriego estándar.

NO_3^- mmol l^{-1}	$H_2PO_4^-$ mmol l^{-1}	SO_4^{2-} mmol l^{-1}	HCO_3^- mmol l^{-1}	NH_4^+ mmol l^{-1}	K^+ mmol l^{-1}	Ca^{2+} mmol l^{-1}	Mg^{2+} mmol l^{-1}	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm	Cu ppm	CE dS m^{-1}
7.86	1.56	2.09	0.5	0.50	5.38	3.08	1.26	2	1.60	0.28	0.28	0.12	2

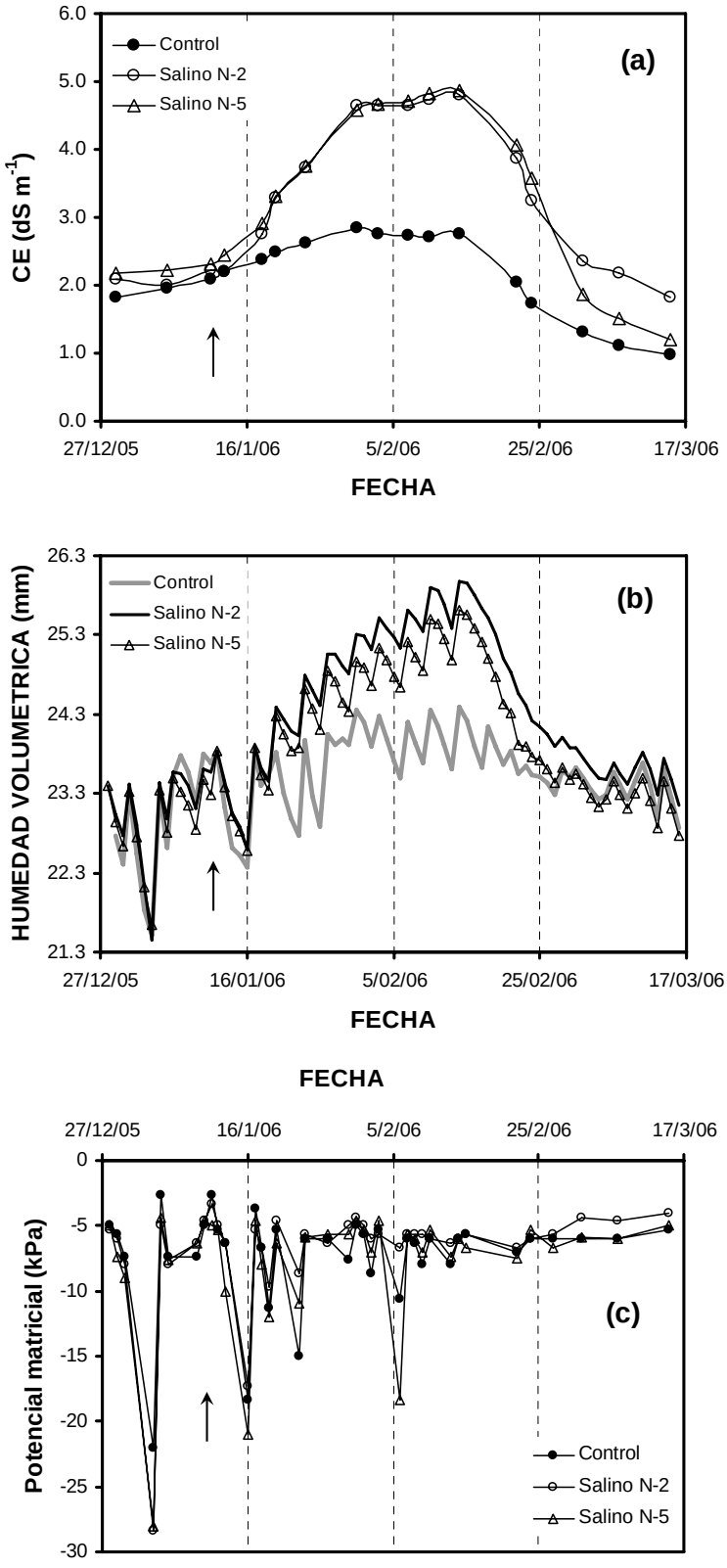

Figura 1: Evolución de la conductividad eléctrica de la solución del suelo (CE_{ss}) medida con sondas de succión a 10 cm de profundidad (a), del contenido volumétrico de agua o humedad volumétrica del suelo medida con un sensor de capacitancia entre 5-15 cm de profundidad (b), y del potencial matricial medido con tensiómetros a 10 cm de profundidad (c) en los tres tratamientos. La flecha indica el comienzo de la aplicación de los tratamientos (11/01/06).