

EVOLUCIÓN DE LA SALINIDAD EN UN SUELO IRRIGADO DEL SUDOESTE BONAERENSE

MARÍA ELINA AGUIRRE^{1,2}; VICTORIO RAÚL ELISEI¹; MARTA AURELIA COMMEGNA¹
& RAÚL MANUEL SANTAMARÍA¹

Recibido: 21-12-09

Recibido con revisores: 30-08-11

Aceptado: 31-08-11

SOIL SALINITY EVOLUTION UNDER IRRIGATION IN SOUTHWESTERN BUENOS AIRES

ABSTRACT

The objective of this study was to elucidate the effect of drip irrigation on the salinity and sodicity of the soil under a 50-year old olive plantation, located near the town of Faro, District of Coronel Dorrego, Province of Buenos Aires. The irrigation water has an electrical conductivity of 2.1 dSm^{-1} and a sodium adsorption ratio of 13.8 dSm^{-1} . The irrigation system is composed of two lateral drip lines in each row of trees. Nozzles with a nominal flow rate of 1 L h^{-1} were spaced at 0.7 m. Soil samples were taken from a 50 by 1,000 m area. Four samples were taken from the front, two in the middle and two at the end. In each sampling point, samples were taken from four horizons under a nozzle and between nozzles. Salinity and sodicity were related to electrical conductivity (EC) and to the sodium adsorption ratio (SAR), calculated from the saturation extract analysis of soil samples. After three irrigation seasons, the EC of the soil extracts increased to values close to the EC of the irrigation water and the soil SAR increased ten-fold. According to these observations, the appearance of sodicity problems becomes highly probable if the SAR of the irrigation water is not corrected. These observations lead to the following question: are the salt content of irrigation water and weather conditions compatible for maintaining a sustainable agriculture in southwestern Buenos Aires? In order to answer this question, further studies over a wider period of time are needed since most sampling sites do not exhibit temporal stability in relation with the average conditions of salinity and alkalinity.

Key words. Temporal variability, olive, irrigation, sodicity.

RESUMEN

Este trabajo es un estudio de la influencia del riego por goteo sobre la salinidad y sodicidad del suelo en una plantación de olivo de 50 años de edad, cercana a la localidad de Faro, distrito de Coronel Dorrego, provincia de Buenos Aires. El agua utilizada tiene una conductividad eléctrica de $2,1 \text{ dSm}^{-1}$ y una relación de adsorción de sodio (RAS) 13,8. El sistema de irrigación está compuesto por dos líneas de goteros por fila de árboles. Los emisores presentan un caudal de 1 L h^{-1} y están espaciados a 0,7 m. La toma de muestras se efectuó en una parcela de 50 por 1.000 m, cuatro muestras al inicio, dos en el medio y dos al final. En cada ubicación se tomaron muestras para cada uno de los cuatro horizontes del perfil, debajo del gotero y entre goteros. La salinidad y la sodicidad fueron analizadas en relación con los valores experimentales de la conductividad eléctrica (CEes) y los de RAS calculados, ambos de los extractos de saturación de las muestras. Después de tres temporadas de irrigación se determinó que a) la CEes se incrementa hasta valores cercanos a los del agua de irrigación, b) el incremento de RAS es superior en diez veces los valores iniciales. De acuerdo con esto la aparición de problemas de sodicidad es altamente probable sin una enmienda del RAS del agua de irrigación. El comportamiento observado implica la siguiente cuestión: ¿el tipo y concentración de sales del agua de irrigación y las condiciones climáticas son compatibles para el cultivo sustentable del olivo en el sudoeste bonaerense? Para contestar esta pregunta se necesitan estudios posteriores en un período de tiempo más amplio, ya que la mayoría de los sitios muestreados no exhiben estabilidad temporal en relación con las condiciones promedio de salinidad y alcalinidad del suelo.

Palabras clave. Estabilidad temporal, olivo, riego, sodicidad.

1 Dpto de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Altos de Palihue, 8000-Bahía Blanca.

2 Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires. Autor para correspondencia: maguirre@criba.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La región Sudoeste de la provincia de Buenos Aires ha sido incluida recientemente en una ley de promoción que abarca distintos aspectos, entre ellos el fomento del cultivo del olivo, del cual hay experiencia zonal con plantaciones cultivadas en secano por más de 50 años.

La producción del olivo se incrementa considerablemente con el aporte de agua de riego en momentos fenológicos críticos o en años de baja pluviometría (Pastor *et al.*, 1999) y esto ha sido tenido en cuenta por productores locales en la implantación de nuevos olivares.

Tal práctica se ve favorecida en la región por la presencia de agua subterránea de fácil extracción mediante perforaciones poco profundas (Paoloni & González Uriarte, 2005), de bajo caudal, pero con tenores salinos considerados medios y altos, con el consiguiente riesgo que conlleva su utilización en el cultivo.

La mayoría de los suelos irrigados en el mundo están expuestos al peligro de la salinización o sodificación y estimaciones de la FAO (1976) indican que más del 50% de estas tierras han sido dañadas por salinización secundaria. En el ámbito regional, este problema se puede observar en suelos bajo riego del área de IDEVI y Alto Valle en la provincia de Río Negro y en el área de CORFO en la provincia de Buenos Aires, en riego por surcos y conductividad del agua entre 0,5 y 1 dS m⁻¹.

Suelos de 21 localidades del norte de la región Pampeana después de 10 años de riego suplementario con aguas de una conductividad promedio de 0,78 dS m⁻¹ mostraron un avance de los procesos de alcalinización y sodificación y el cambio de algunas variables físicas, como disminución del índice de infiltración y aumento del índice de escurrimiento (Mon *et al.*, 2007).

Las aguas que predominan en el área centro sur de la provincia de Buenos Aires, que incluye el partido de Coronel Dorrego, están clasificadas como C3 S3 (aguas altamente salinas y altas en sodio) según Richards (1954) y el 53% de 17 análisis de agua para riego del área, presentaron valores de conductividad eléctrica entre 0,75 a 2,25 dS m⁻¹ y un valor RAS entre 11 y 18 (Baez, 1996).

Aguas de estas características, obligan generalmente a realizar estudios para detectar anticipadamente peligros potenciales para el suelo y adoptar prácticas de riego que permitan alcanzar un balance salino favorable.

Las líneas tentativas sugeridas para pronosticar la salinización de los suelos se basan en el conocimiento de los procesos involucrados, en el monitoreo permanente de los niveles de salinidad y sodicidad mediante análisis

químicos y físicos que permitan conocer la concentración y composición de las sales presentes en el suelo, en la calidad del agua de riego y sus posibles cambios de composición en el tiempo, en la profundidad de la napa freática, en los factores ambientales que afectan la evapotranspiración y en el comportamiento del cultivo en relación con la presencia de sales en el perfil del suelo.

La cantidad de sal que se acumula en el suelo depende en gran medida del contenido salino del agua de riego, de la cantidad de agua aplicada y de que una cantidad adicional de agua, ya sea de riego o de lluvia, lixivie las sales de la zona efectiva de raíces (Rhoades & Halvorson, 1977).

En nuestro caso un tema a dilucidar lo constituye el movimiento del agua frente a la barrera petrocálcica ya sea por su lenta infiltración o su escurrimiento subsuperficial.

En la zona comienza a difundirse como único método la utilización del riego por goteo, sin embargo no existe experiencia regional sobre la efectividad de este sistema en el largo plazo en relación con la acumulación de sales y la necesidad de prácticas de lavado.

Se reconoce en general que, con excepción de los suelos muy permeables, la profundidad promedio que alcanza el agua en el riego por goteo es menor que en el riego por surcos o inundación, y que los goteros mojan solo parte del suelo, por lo que su uso prolongado podría causar una acumulación salina, particularmente en la periferia de las áreas mojadas (Burt & Isbell, 2003).

Para un manejo eficiente de los suelos afectados por sales es necesario medir la salinidad del suelo que es dinámica y espacialmente variable (Douaik *et al.*, 2006), analizando el rango de estabilidad temporal (Vachaud *et al.*, 1985) de las diferentes propiedades químicas que evalúan la salinidad y sodicidad de los suelos sometidos al riego.

Se considera que el riego suplementario por goteo en la región del sudoeste bonaerense, con uso de aguas bicarbonatadas-sódicas en suelos con un horizonte que podría impedir el libre drenaje y con láminas de lavado originadas sólo por la percolación profunda de precipitaciones anuales, incrementaría la salinidad y la sodicidad del suelo.

Los estudios realizados en el presente trabajo evaluarán si el manejo del sistema de riego por goteo, de reciente implementación en algunas plantaciones de olivo, es compatible con el contenido salino de las aguas utiliza-

das y con las condiciones climáticas del área, permitiendo el mantenimiento de una agricultura sostenible para la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

La plantación bajo estudio (con 50 años de edad) se encuentra ubicada en las cercanías de la localidad de Faro, en el partido de Coronel Dorrego y las características del suelo se exponen en la Tabla 1 (Teruel & Castelli, 2007). Se trata de un perfil somero, clasificado como Paleudol petrocálcico, de entre 60 y 80 cm de profundidad que descansa sobre una capa de tosca.

El sistema de riego está compuesto por dos líneas de goteros paralelas ubicadas a ambos lados de cada fila de árboles, con un distanciamiento de 70 cm entre goteros y caudal de 1 L h⁻¹ por emisor.

El agua utilizada para el riego se obtiene de una perforación de 52 metros de profundidad y su análisis químico se expone en la Tabla 2 (Teruel & Castelli, 2007).

El riego se realizó mediante dos modalidades: de noviembre de 2005 a abril de 2006 por surco, por excepción, con una dosis de 900 L/árbol cada 15 días, y a partir de noviembre 2006 por goteo.

La toma de muestras de suelo se realizó en cuatro oportunidades: previo a la aplicación de riego agosto de 2005, en abril y octubre de 2007 y en octubre de 2008.

Las muestras fueron tomadas a lo largo de la línea de goteros, denominando los sitios coincidentes con los árboles como inicio (muestras 1, 2, 3 y 4), medio (muestras 5 y 6) y final (muestras 7 y 8) constituyendo una parcela de 1.000 m de longitud, con una pendiente del terreno menor de 0,5%. Para cada medición se seleccionaron los emisores más cercanos al tronco de los olivos, de las dos líneas de riego evitando extraer muestras de un mismo lugar. En cada ubicación se tomaron muestras de suelo debajo del gotero (BG) y entre goteros (EG), para cada uno de los 4 horizontes que constituyen el perfil. En el mes de octubre 2007 se muestrearon solamente los sitios 1, 2, 5 y 7.

En octubre de 2008 se realizó además una transecta (T) en sentido perpendicular a las líneas de goteros. Esta toma de muestras se efectuó en los sitios tres (T3) y ocho (T8) de la parcela, con cinco lugares, dos bajo gotero y tres fuera de goteros, lo que resulta en un espaciado de un metro y medio entre muestras.

En las muestras se realizaron las siguientes determinaciones según las técnicas recomendadas por el Manual para el Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos

Tabla 1. Características generales del suelo en estudio.

Table 1. General characteristics of the studied soil.

Propiedades	Ap	A ₂	Bt	BC
Profundidad (cm)	0-11	11-23	23-45	45-60
Arcilla (g kg ⁻¹)	205	244	325	295
Limo 2-50 μm (g kg ⁻¹)	311	277	239	256
Arena (g kg ⁻¹)	484	479	436	449
Clase textural	Franco (F)	F	Farcilloso (Fa)	FaA/Fa
Retención de agua (0,03MPa) V V ⁻¹	32,4	29,1	32,6	-
Materia orgánica (g kg ⁻¹)	51	27	17	9
pH agua 1:2,5	6,9	7,0	7,4	7,6
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	17,1	19,5	24,3	19,5
Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	13,0	13,3	18,5	19,3
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	1,8	2,0	2,1	2,2
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2,5	1,6	1,4	1,2
Porcentaje de sodio intercambiable (%)	10,5	10,3	8,6	11,3
Conductividad eléctrica en el extracto de saturación (dS m ⁻¹)	0,49	0,41	0,30	0,29

Tabla 2. Características generales del agua de riego.

Table 2. General characteristics of the irrigation water.

pH	CEag	Ca ⁺² + Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	RAS
	dS m ⁻¹							
					meq L ⁻¹			
8,1	2,1	3,0	17	0,1	8,8	8,3	5,3	13,8

(Richards, 1954). Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEes), cationes y aniones solubles en el extracto de saturación y pH. Se calculó además el valor RAS y carbonato de sodio residual (CSR). En solo dos sitios se determinó el PSI como el cociente entre la concentración de Na⁺ de intercambio, por fotometría de emisión a la llama y la capacidad de intercambio catiónico por desplazamiento con acetato de amonio y posterior valorización del sodio.

Análisis estadísticos

Los resultados químicos fueron analizados por Anova doble, considerando las ubicaciones BG y EG y los años de muestreo como factores. Previamente se comprobó la homogeneidad de la varianza efectuando las transformaciones necesarias. Las diferencias entre medias de tratamientos fueron determinadas mediante el test de Tukey ($p > 0,05$). Se utilizó el programa InfoStat.

La estabilidad temporal fue definida por Vachaud *et al.* (1985) como la asociación temporal invariable entre localización espacial y valores estadísticos paramétricos clásicos de una propiedad del suelo. El test paramétrico de diferencias relativas (Vachaud *et al.*, 1985) permite representar gráficamente los datos con el objeto de destacar las diferencias, en términos de constancia en la estabilidad temporal, entre sitios de muestreo. La diferencia relativa dij se calcula a partir de

$$\bar{S}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{ij} \quad (1)$$

donde

$$\delta_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{S_j} \quad (2)$$

$$\Delta_{ij} = S_{ij} - \bar{S}_j \quad (3)$$

Siendo S_{ij} el valor tanto para la conductividad eléctrica o el valor RAS en el punto i y para el tiempo j y N los sitios de muestreos. Por tanto, la diferencia relativa media para cada punto está definida como

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (4)$$

donde m es el número de muestreo en el tiempo.

La desviación estándar de la diferencia relativa media en cada punto, está expresada por

$$\sigma(\bar{\delta}_i) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2} \quad (5)$$

Desde este punto de vista se definen como sitios de medición temporalmente estables aquellos con un reducido valor de $\sigma(\bar{\delta}_i)$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presenta la composición química del agua utilizada para riego. El agua se clasifica como S3C3, agua altamente salina y alta en sodio (Richards, 1954) o bien como C2S2 de mediana salinidad y sodicidad (Ayers & Westcot, 1976). El análisis permite establecer que predominan los bicarbonatos, por lo que existiría la tendencia del calcio y del magnesio a precipitar en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo aumentando así la proporción relativa de Na (Eaton, 1950). Este es un factor a tener en cuenta ya que otro es la concentración de bicarbonatos en el agua de riego que alcanza 8,3 mmol_c L⁻¹ con CSR de 5,3 mmol_c L⁻¹, superando ampliamente el valor de 2,5 mmol_c L⁻¹ considerado límite para aguas de riego.

Conductividad eléctrica

De acuerdo a las significancias estadísticas del análisis de la varianza (factores o interacciones), se procedió a la comparación múltiple de Tukey. En la Tabla 4 se pueden observar los valores de CEes, RAS y pH de los diferentes horizontes que componen el perfil del suelo para la secuencia de meses muestreados: inicio 2005, abril y octubre 2007 (abr-07, oct-08) y octubre 2008 (oct-08).

Las condiciones BG y EG evaluadas indican que no hubo diferencia estadística significativa $p > 0,05$ % en la acumulación de sales.

Para todos los horizontes del suelo la secuencia de aumento temporal de la CEes (ini, oct-07, abr-07 y oct-08) es similar, con un proceso de salinización uniforme en el perfil.

El aumento significativo ($p < 0,05$) de la CEes de todos los horizontes entre oct-07 y oct-08 se podría explicar por las escasas lluvias ocurridas en otoño-invierno 2008 que fueron de 147 mm de lluvia, asociados a los 46

Tabla 3. Precipitaciones y riego aplicado en los períodos considerados.
Table 3. Rainfall and irrigation water over the periods considered.

Períodos	Lluvias (mm)	Riego (mm)
Nov-05/Abr-06	469,4	108
May-06/Oct-06	224,2	
Nov-06/Mar-07	366,7	250
Abr-07/Set-07	295,5	
Oct-07/Nov-07	116,5	
Dic-07/Mar-08	164	150
Abr-08	21	10
May-08/Jul-08	74	
Ago-08/Sep-08	52	36

mm de riego, con respecto a los 295,5 mm (Tabla 3), indica en el 2007 un proceso de lixiviación de las sales por acción del agua de lluvia. Se puede observar además que el incremento de la CEes en superficie supera en promedio la CEes de los horizontes inferiores, lo que sería consecuencia del balance hídrico negativo con una mayor evaporación desde el bulbo húmedo de los goteros y acumulación de sales en superficie. Cabe aclarar que el productor no tiene en cuenta el requerimiento de un

manejo de lavado de sales, dado que los volúmenes de agua disponible son escasos y costosos y no permite utilizar una parte para el lixiviado de las sales.

Con respecto al muestreo realizado en octubre de 2008 los valores de CEes se han incrementado, llegando a un valor máximo en promedio de 2,01 dS m⁻¹ en el horizonte Ap. Este fue el año con menor pluviometría y riego suplementario a partir de agosto (Tabla 3). El riego produjo incrementos de CEes en el suelo acercándose a los valores de conductividad del agua de riego. Dicha salinización disminuye cuando en otoño invierno ocurren lluvias que logran lavar los horizontes, afirmación que se debe corroborar con más años de investigación. Desde el inicio del estudio nunca se ha detectado la formación de una napa de agua o saturación del horizonte inferior, que requiriera drenaje de la misma, presumiblemente se produce un deslizamiento del agua infiltrada sobre la capa de tosca, hacia las partes bajas del terreno.

En la Tabla 5 se exponen parámetros estadísticos descriptivos como media, error estándar (E.E.), valor medio, mínimo (Min) y máximo (Máx), de algunas locali-

Tabla 4. Comparación múltiple de Tukey de los valores de CEes, RAS y pH obtenidos de los extractos de saturación del suelo.
Table 4. Tukey's multiple comparison of ECes, SAR and pH values from saturation extract of soil samples.

Horizontes	CEes (dSm ⁻¹)		RAS		pH				
	Factor	Media	Factor	Media	Factor	Media			
Ap	Ini	0,41	a	Ini	0,88	a	Ini	6,70	a
	Oct-07	1,08	b	Oct-08	9,53	b	Oct-07	7,25	b
	Abr-07	1,30	bc	Oct-07	12,88	c	Abr-07	7,26	b
	Oct-08	2,01	c	Abr-07	12,96	bc	Oct-08	7,67	b
A ₂	Ini	0,33	a	Ini	0,80	a	Ini	6,88	a
	Oct-07	0,93	b	Abr-07	10,65	b	Oct-07	7,29	a
	Abr-07	1,15	b	Oct-07	12,04	b	Abr-07	7,29	a
	Oct-08	1,58	c	Oct-08	12,51	b	Oct-08	7,98	b
Bt	Ini	0,27	a	Ini	0,90	a	Abr-07	7,04	a
	Oct-07	0,75	b	Abr-07	8,51	b	Ini	7,19	a
	Abr-07	0,99	c	Oct-08	9,94	b	Oct-07	7,25	a
	Oct-08	1,16	c	Oct-07	10,41	b	Oct-08	7,68	b
BC	Ini	0,26	a	BG/Ini	0,94	a	Abr-07	7,10	a
	Oct-07	0,64	b	EG/Ini	0,94	a	Oct-07	7,29	a
	Abr-07	0,95	c	EG/Abr-07	5,89	b	Ini	7,39	a
	Oct-08	1,21	c	BG/Oct-07	7,20	bc	Oct-08	8,14	b
				EG/Oct-08	8,50	bc			
				BG/Abr-07	8,88	c			
				EG/Oct-07	9,84	c			
				BG/Oct-08	10,38	c			

Letras diferentes dentro de la columna presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Tabla 5. Estadística descriptiva de la CEes, de algunas situaciones y fechas de muestreo.
Table 5. Descriptive statistics for ECes of some situations and dates of sampling.

Factor 1	Factor 2	Variable	Media	E.E.	Mín	Máx
BG	Oct-08	CEes-Ap (dSm ⁻¹)	1,85	0,25	0,70	3,04
EG	Oct-08	CEes-Ap (dSm ⁻¹)	2,17	0,28	1,12	3,20
EG	Oct-08	CEes-A ₂ (dSm ⁻¹)	1,80	0,14	1,20	2,50
BG	Oct-08	CEes-BC (dSm ⁻¹)	1,29	0,17	0,90	2,20
EG	Abr-07	CEes-BC (dSm ⁻¹)	1,08	0,17	0,49	2,20

Referencia: E.E. = error standard, Mín = valor mínimo, Máx = valor máximo.

zaciones, que representan valores determinados de CEes, iguales o mayores en una unidad a la conductividad eléctrica del agua de riego (CEag). Los valores de CEes encontrados están distantes de los 4 a 6 dS m⁻¹ citados por Vega *et al.* (2001), considerados limitantes y con la posibilidad de una reducción del 10% en la productividad del olivo. Mass & Hoffman (1977) estiman un 10% de descenso en la producción cuando la CEes es de 3,8 y la CEag de 2,6 dS m⁻¹. Aragües *et al.*, 2005 explican que la tolerancia del olivo a la salinidad inicial es alta pero declina bruscamente con el tiempo de exposición a las sales y disminuye sensiblemente debido principalmente al incremento de concentraciones tóxicas de Na⁺ en las hojas. Melgar *et al.* (2009) y Weissbein *et al.* (2008) sugieren que para cultivar eficientemente olivos adultos regados con agua de moderada salinidad (4,2 dSm⁻¹) se deben manejar adecuadamente los requerimientos de lavado y mantener una CEes debajo de la zona radicular menor de 6 dSm⁻¹.

RAS

Los valores de RAS y PSI del suelo en su estado inicial (1 y 10,5%, respectivamente) no guardan la correlación que propone el laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.

Los valores de RAS en el horizonte Ap en el mes de octubre 2008 (Tabla 4) presentan un valor promedio (BG y EG) menor que en las fechas anteriores de riego, como consecuencia de un aumento de la concentración de Ca²⁺+Mg²⁺ en los extractos de saturación (6,07 vs 3,2 mmol_c L⁻¹, datos no consignados en el texto). Se estima que se ha producido un intercambio de Ca²⁺ + Mg²⁺ en el suelo por el Na⁺ proveniente del agua de riego.

En los horizontes A₂ y Bt, el valor de RAS tuvo un aumento pero no presentó diferencias significativas entre los años bajo riego.

En el horizonte BC se observa una interacción estadísticamente significativa entre situaciones BG y EG y fechas de muestreos. Esto demuestra la dificultad de predecir la evolución de los parámetros químicos ante intervenciones antrópicas en el sistema suelo-planta, como lo constituye el riego con aguas de baja calidad (Vázquez *et al.*, 2006).

Con sólo tres años de riego se observa que la RAS aumentó más de 10 veces respecto al valor original. Esta rápida evolución contrasta con trabajos efectuados por Vázquez *et al.*, (2008), quienes registran estos valores después de 10 años de simulación de riego suplementario. Costa & Aparicio (1999) en suelos del sudeste bonaerense (Necochea, Energía, Orense, etc.) luego de dos años consecutivos de evaluación determinaron que en situaciones de riego suplementario, con aguas de similar calidad, se llegó a valores estables de la RAS en torno a 5-6. Génova (2004) concluyó que por el uso de aguas bicarbonatadas sódicas en suelos de Balcarce, Coronel Suarez, Huanguelén, General Lamadrid y Laprida, regados complementariamente, no se registraron valores de CEes y de PSI que indiquen cambios drásticos que afecten la calidad de los suelos, ni que signifiquen degradaciones irreversibles. No obstante Costa & Aparicio (2008) trabajando en la región central en el Sudeste de la Región Pampeana en lotes con pivot central, con riego suplementario observaron aumentos considerables de la CEes, pH y PSI del suelo. Se debe hacer notar que las situaciones no son totalmente comparables por ser distintos los sistemas de riego, pivot vs gotero y las precipitaciones.

Muestras analizadas al final del ensayo (oct-08, punto 2, horizonte A₂) para las situaciones BG y EG presentaron un valor RAS de 18,9 y 20 y un PSI de 20,6 y 19,3 respectivamente, manteniéndose la relación RAS-PSI.

Suelos en equilibrio con soluciones salinas de alto valor de RAS tienden a sodificarse por el intercambio que

se produce entre los iones Na^+ y los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} del complejo de cambio, con el consiguiente deterioro de las propiedades físicas del suelo, la permeabilidad entre otras, especialmente en los horizontes más ricos en arcilla (Vega Macías & Pastor Muñoz-Cobo, 2005). Peineman *et al.* (1998) trabajando con suelos de la Región Pampeana, encontraron que para un volumen de agua de riego determinado, la pérdida de la conductividad hidráulica del suelo es menor cuando los contenidos de arcilla + limo son mayores. La estructura de los suelos de la serie Pergamino (Argiudol típico) con alto valor de materia orgánica, según Andriulo *et al.* (2002), es altamente resistente a la acción degradante de la alternancia de aguas bicarbonatadas sódicas y agua de lluvia, y su resistencia disminuye con el aumento del valor RAS del agua de riego. Estas condiciones son similares a las del presente estudio, donde el contenido de materia orgánica del horizonte Ap es de 51 g kg^{-1} .

Los aumentos del valor RAS en estas condiciones particulares del área –volumenes de agua escasos y de alto costo–, aconsejan continuar las investigaciones con la corrección del valor RAS del agua de riego.

pH

Con respecto al pH (Tabla 4) se observa en el horizonte Ap un incremento del mismo por efecto del riego sin diferencias estadísticas entre los años de muestreo. En los siguientes horizontes recién en el tercer año de riego se manifiesta dicha diferencia. Los valores óptimos de pH para el cultivo del olivo se encuentran entre 7 y 8,5 (Porta Casanellas & López-Acevedo, 2005), por lo que los valores encontrados en el ensayo no serían restrictivos para la producción.

Estabilidad temporal

La Figura 1 muestra la posición que ocupa cada sitio de muestreo para cada horizonte del suelo. En el eje de

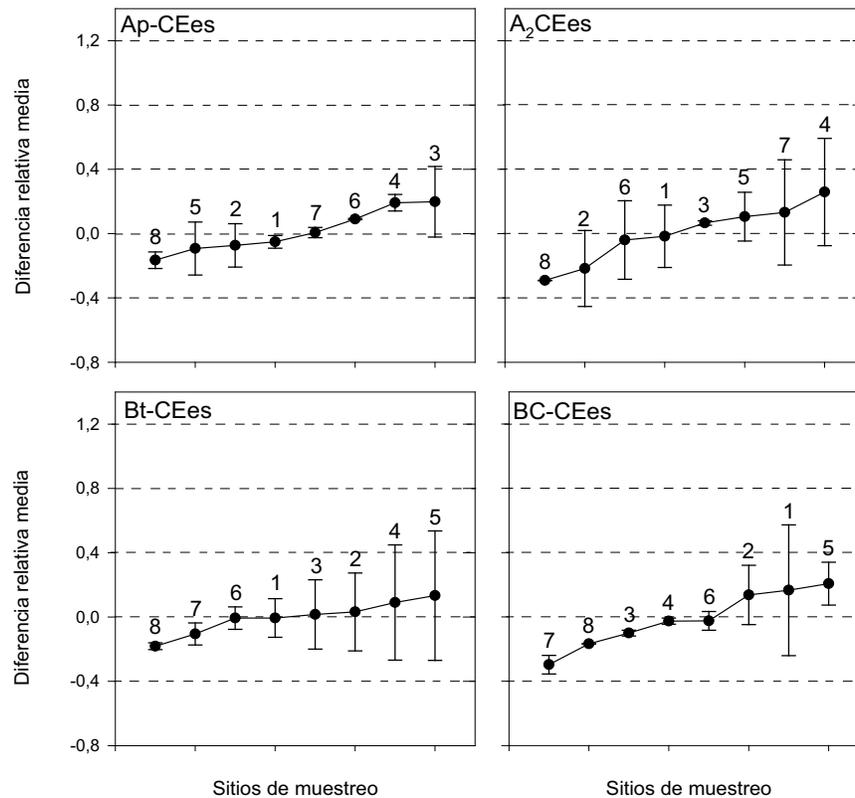


Figura 1. Diferencia relativa media de los sitios de muestreo, de los valores CEes, para los diferentes horizontes. Barras verticales representan el desvío estándar.

Figure 1. Mean relative differences for ECes of the sampling sites from different horizons. Vertical bars represent standard deviation.

ordenadas se muestra la diferencia relativa media (ecuación 4) de cada sitio con respecto a la media de la CEes o RAS, siendo los sitios con diferencias relativas negativas, zonas con CEes o RAS por debajo de la media y los sitios positivos, los que superan ésta. El eje de abscisas representa la posición ocupada por cada sitio de muestreo, siendo los primeros con menor CEes o RAS y los últimos con mayor CEes o RAS. Por último, las barras de error de cada punto, muestran la desviación típica (ecuación 5) de la diferencia relativa media (ecuación 4).

También en la Figura 1 se muestran los resultados del análisis de estabilidad temporal para los datos de CEes con el promedio de los valores de BG y EG en cada sitio y para los horizontes Ap, A₂, Bt y BC. Se trabaja con promedio debido a la no evidencia de diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las ubicaciones. Las mayores diferencias relativas medias se alcanzan en el horizonte A₂ tomando valores entre -0,29 a +0,26, disminuyendo esta diferencia para el horizonte Bt y manteniéndose entre -0,18 a +0,13, posiblemente debido a su capacidad buffer por su mayor contenido de arcilla.

En los horizontes Ap, A₂ y Bt se aprecia que el punto 8 es el que presenta menor CEes de la parcela, con una desviación típica estrecha principalmente en el A₂ y Bt. En el horizonte BC el punto 8 se desplaza hacia la derecha ocupando el punto 7 de menor valor de CEes. Los demás sitios no muestran un patrón de comportamiento de diferencia relativa media para los distintos horizontes, indicando solo la variabilidad de la salinidad en dichos lugares y ningún efecto determinante de ubicación en la parcela.

En la Figura 2 se muestran los resultados del análisis de estabilidad temporal para los datos de RAS con el promedio de los valores de BG y EG en cada sitio y para los horizontes Ap, A₂, y Bt. Se trabaja con promedio debido a la no evidencia de diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las ubicaciones

Se aprecia que el horizonte Bt presenta diferencias relativas medias, tomando valores entre -0,27 y +0,31 y disminuyendo bastante para el horizonte A₂. Esta poca variación de RAS con respecto a la media de la parcela no se traduce en una mayor estabilidad temporal, ya que la desviación típica en la zona de mayor RAS posee los valores más altos: en A₂ el punto 2 con 0,49; en Bt punto 1 con 0,37 y en Ap punto 6 con 0,31. Igual que en la CEes no hay un patrón de comportamiento de los sitios en los diferentes horizontes.

En la Figura 3 se muestran los resultados del horizonte BC de las ubicaciones BG y EG debido a la presencia de interacciones entre ellos. La situación BG presenta una desviación típica en todos sus sitios de muestreo, menor de $\pm 0,24$, indicando una mayor estabilidad temporal que en EG. En esta situación, el rango de variación de las diferencias relativas medias es de -0,43 a +0,47, mayor que en BG. Existe cierta correspondencia entre los sitios de bajo y alto valor RAS, a pesar de estar en diferente posición con respecto a la media. Los sitios bajos serían el 3, 6 y 8 y los altos 1, 4 y 5.

La metodología utilizada permite la identificación de los sitios representativos para el control de la CEes y RAS media, es decir, aquellos que se sitúan próximos al cero

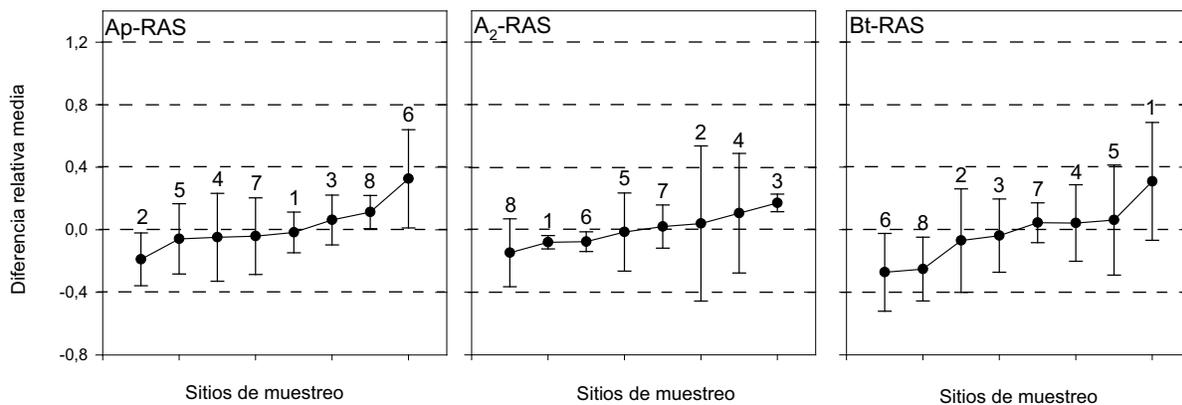


Figura 2. Diferencia relativa media de los sitios de muestreo, de los valores RAS, para los horizontes Ap, A₂ y Bt. Barras verticales representan el desvío estándar.

Figure 2. Mean relative differences for SAR of the sampling sites for the horizons Ap, A₂ y Bt. Vertical bars represent standard deviation.

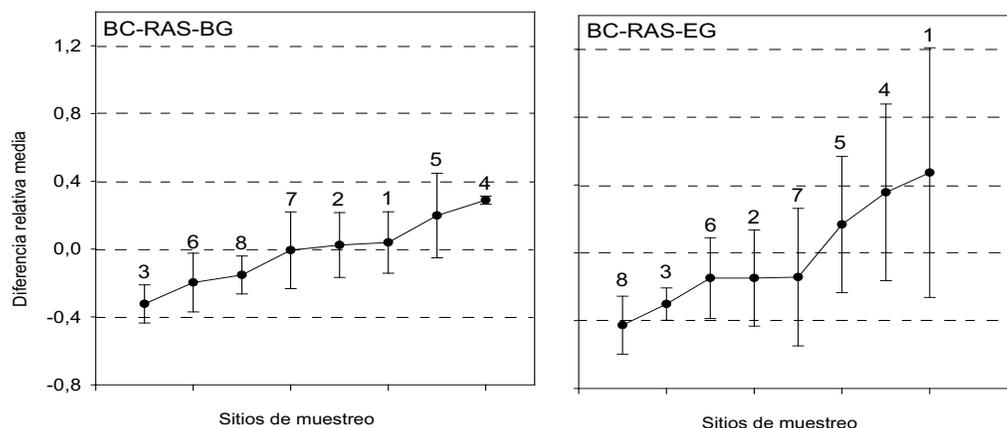


Figura 3. Diferencia relativa media de los sitios de muestreo, de los valores RAS, para el horizonte BC, BG: bajo gotero, EG: entre gotero. Barras verticales representan el desvío estándar.

Figure 3. Mean relative differences for SAR of the sampling sites for the horizon BC. BG: below drip emitter, EG: between drip emitter. Vertical bars represent standard deviation.

de diferencia relativa media y además tienen el valor mínimo de desviación estándar (Grayson & Western, 1998, citado en Martínez Fernández *et al.*, 2003). Los lugares correspondientes a dichos sitios serían los que más se aproximarían al valor medio de la parcela. La identificación de estos sitios resultaría de gran utilidad, ya que permitiría a partir de este momento, reducir el muestreo a un solo punto, cuando el único dato que se necesitara fuera el promedio (Douaik *et al.*, 2006). Si se utiliza el criterio del 5% de desviación estándar máxima, como ha sido propuesto (Van Pelt & Wierenga, 2001, citado en Martínez Fernández *et al.*, 2003), solo el sitio 7, en el horizonte Ap reúne tal criterio para los valores de CEes. Esto revela que en los demás horizontes es imposible identificar sitios estables en el tiempo y representativos de las condiciones medias salinas o alcalinas. Para ello es necesario un período más extenso de observaciones.

Transectas

En la Figura 4 se presentan los gráficos de contorno de CEes, RAS y pH. La evaporación del agua en BG sería la responsable del movimiento de sales hacia la superficie, cuyos valores de CEes son de 3,3 y 2,7 dS m⁻¹ en T3. En el horizonte BC en T3 y 8 se presenta un leve aumento de sales, entre goteros de diferentes líneas y fuera de ellos, donde el suelo permanece seco y menos afectado por el riego de los goteros. El frente húmedo durante la irrigación movería la sal en profundidad y a los costados

de las líneas de goteros, fenómeno también observado por Burt & Isbell (2003) para un suelo franco. De acuerdo a la baja concentración de sales, en profundidad, debajo de los goteros, se puede estimar que si bien la cantidad de agua recibida incluyendo la de lluvia logra mojar el perfil en esos sitios predomina la evaporación superficial con la consiguiente acumulación de sales. La transecta 8 presenta menores valores de CEes que la T3 en el horizonte Ap lo que está en concordancia con los valores de diferencia relativa media lo que indica el sitio de menor y mayor valor de CEes de la parcela, no encontrando aún una explicación a este comportamiento.

Con respecto al valor RAS se observan isoclinas verticales cuyos valores decrecen en las dos transectas hacia ambos lados desde los goteros. Esta diferencia se debería a la permeabilidad del suelo y sería resultado de un proceso de movimiento de solutos.

El pH se distribuye de forma diferente en las dos transectas. A diferencia de la T3, T8 presenta bolsones de aumento de pH en los horizontes A₂ y Bt bajo los emisores de goteo.

La heterogeneidad observada refleja la naturaleza espacial compleja de las propiedades físicas y químicas del suelo.

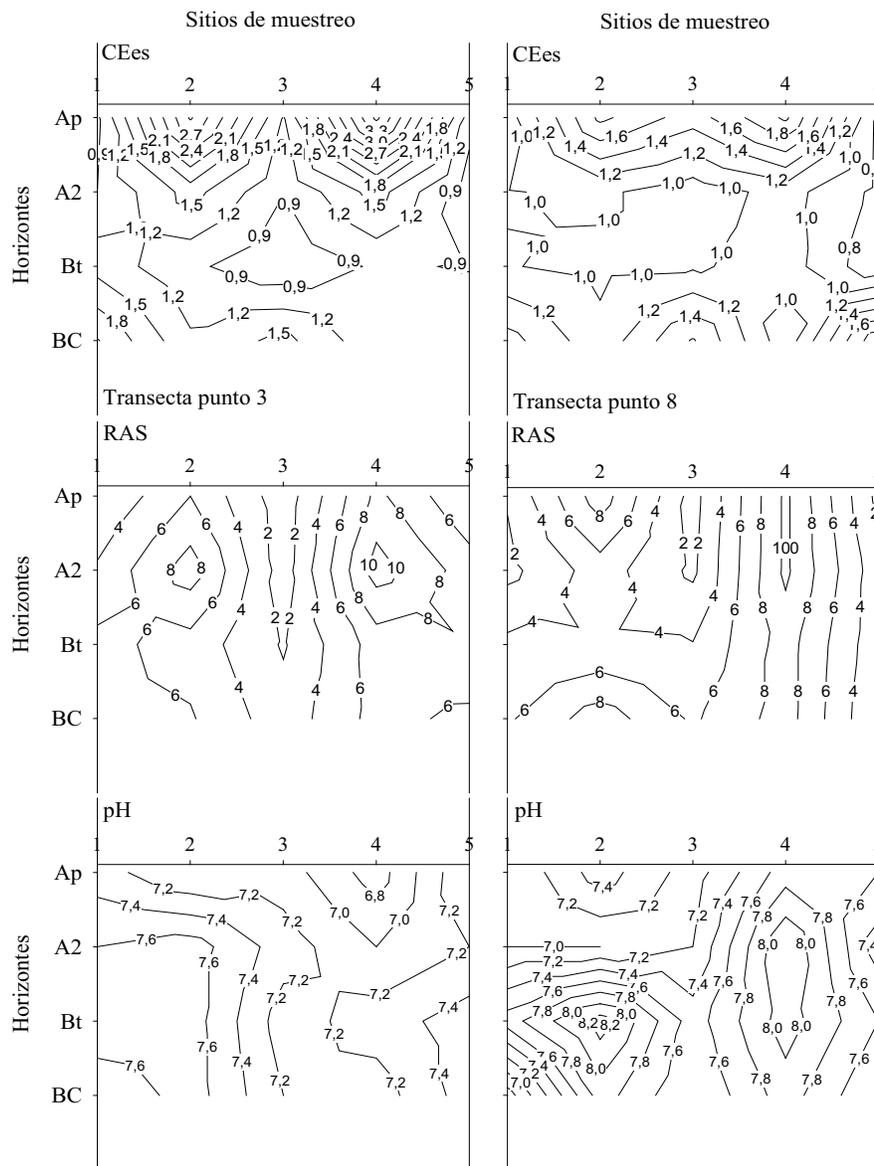


Figura 4. Perfiles de concentración de CEes, RAS y pH en la transecta 3 y 8. Sitios 2 y 4 bajo gotero.
Figure 4. Salinity concentration profile of CEes, RAS and pH in the 3 and 8 transept. Below drip emitter 2 and 4 point.

CONCLUSIONES

Luego de tres temporadas el riego suplementario provocó incrementos de CEes en el suelo con valores cercano a la conductividad del agua de riego, sin llegar a la denominación de un suelo salino.

Con respecto a la sodicidad deducida del valor RAS la misma se incrementó a valores superiores a 10 veces el valor original.

Sólo un sitio exhibe estabilidad temporal en el horizonte Ap, en los demás horizontes es imposible identificar sitios estables en el tiempo y representativos de las condiciones medias salinas o alcalinas. Se necesita para ello un período más extenso de observaciones.

Se considera que sin una corrección del valor RAS del agua de riego sería altamente probable la aparición de problemas de sodicidad en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Agr. Ignacio Bottini, propietario del establecimiento por las facilidades brindadas, a la Téc. Emilce Teruel por su colaboración, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur por los subsidios otorgados.

BIBLIOGRAFÍA

- Aragües, R; J Puy; A Royo & JL Espada. 2005. Three-year field response of young olive trees (*Olea europaea* L., cv. Arbequina) to soil salinity: Trunk growth and leaf ion accumulation. *Plant and Soil* 271: 265-273.
- Andriulo, A; M Bueno; J de Orellana; C Sasal & F Rimatori. 2002. Efecto de la relación de adsorción de sodio del agua sobre la estabilidad de agregados. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Argentina, 16-19 abril.
- Ayers, RS & DW Wescot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje. Roma. N° 29 (Rev.1) 173 p.
- Báez, A. 1999. Fuente, calidad y cantidad de agua para riego en el área de la CEI Barrow. *En: Efecto de la calidad del agua de riego sobre las propiedades del suelo. Monografía presentada como requisito para optar al grado académico de Especialista en Producción Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias, Univ. Nac. de Mar del Plata, Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce, 56pp.*
- Burt, C & B Isbell. 2003. Reclamation leaching for Salinity buildup under drip and micro-spray irrigation in arid areas of California. <http://www.itrc.org/reports/salinity/treecropsalinity.pdf> (TRC Report N° R 03-005).
- Costa, JL & V Aparicio. 1999. Efecto de la calidad del agua sobre las propiedades químicas y físicas de suelos bajo riego suplementario en el sud-este de la provincia de Buenos Aires en la República Argentina. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile, 8-12 noviembre, p.82.
- Costa, JL & V Aparicio. 2008. Evaluación de propiedades químicas y físicas en lotes con pívot central en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, 13-16 de mayo, p: 6.
- Douaik, A; M Van Meirvenne & T Tóth. 2006. Temporal stability of spatial patterns of soil salinity determined from laboratory and field electrolytic conductivity. *Arid Land Research and Management* 20: 1-13.
- Eaton, FM. 1950. Significance of carbonates in irrigation water. *Soil Sci.* 69: 123-133.
- FAO. 1975. Prognosis and salinity and alkalinity. Report of the Expert Consultation on Prognosis of Salinity and Alkalinity. FAO, Roma. 268pp.
- Genova, LJ. 2004. Salinidad y sodicidad edáfica de agroecosistemas regados complementariamente en el centro y sur de la provincia de Buenos Aires. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos, 23-24 de junio, p:7.
- Martínez Fernández, J; A Ceballos Barbancho; S Casado Ledesma & C Morán Tejada. 2003. Estabilidad temporal de la humedad edáfica bajo diferentes condiciones ambientales mediterráneas y de uso del suelo. *Estudios de la Zona No saturada del Suelo* 6: 77-82.
- Mass, EV & MO Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. Proc. Amer. Soc. Eng.* 103: 115-134.
- Melgar, JC; Y Mohamed; N Serrano; PA García-Galavís; C Navarro & MA Parra *et al.*, 2009. Long term responses of olive trees to salinity. *Agric. Water Manage.* doi: 10.1016/j.agwat.2009.02.009. 9p.
- Mon, R; C Irurtia; GF Botta; O Pozzolo; F Bellora Melcón & D Rivero *et al.*, 2007. Effects of supplementary irrigation on chemical and physical soil properties in the rolling pampa region of Argentina. *Cien. Inv. Agr.* 34(3): 187-194.
- Paoloni, JD & M González Uriarte. 2005. Geoambiente y evaluación de las aguas freáticas del Partido de Coronel Dorrego (Provincia de Buenos Aires). Edit. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. 108pp.
- Pastor, M.; J Castro; MJ Mariscal; V. Vega & F Orgaz *et al.*, 1999. Respuestas del olivar tradicional a diferentes estrategias y dosis de agua de riego. *Investigación Agraria: Producción Vegetal* 14(3): 393-404.
- Peinemann, N.; M Díaz-Zorita; MB Villamil; H Lusarreta & D Grunewald. 1998. Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. *Ciencia del Suelo* 16: 39-42.
- Porta Casanellas, J & M López-Acevedo. 2005. Agenda de campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente. Mundi Prensa, Madrid. 541pp
- Rhoades, JD & AD Halvorson. 1977. Electrical conductivity methods for detecting and delineating saline seeps and measuring salinity in Northern Great Plains Soils. Agricultural Research Service. U.S. Department of Agriculture, USA, 45pp.
- Richards, LA. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. 171pp.
- Teruel, E & L Castelli. 2007. Caracterización de tres suelos y determinación de parámetros para riego por goteo en el partido de Coronel Dorrego. Trabajo final de Técnico Superior en Suelos y Aguas. Dpto de Agronomía, UNS, 89pp.
- Vachaud, G; A Passerat de Silans; P Balabanis & M Vauclin. 1985. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 822-828.

- Vázquez, M; G Millán & P Gelati. 2008. Simulación del efecto del riego complementario en un suelo Udipsament típico. *Ciencia del Suelo* 26(2): 195-203.
- Vázquez, M; G Millán & P Gelati. 2006. Efecto del riego complementario sobre la salinidad y sodicidad de diferentes suelos del NO y Centro-E de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía* 106(1): 57-67.
- Vega Macias, V & M Pastor Muñoz-Cobo. 2005. Calidad del agua de riego. Riego con aguas salinas. *En: Cultivo del Olivo con Riego Localizado*. Ed. M Pastor Muñoz-Cobo. Mundi-Prensa, Madrid. 187-220.
- Vega, V; J Rojo; M Fernández; J Hidalgo & M Pastor. 2001. Calidad del agua de riego: Efecto de la salinidad en olivar. *En: Programación de riegos en olivar*. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Colección: Agricultura, Serie: Olivicultura y Elaiotecnia. 75-86.
- Weissbein, S; Z Wiesman; Y Ephrath & M Silberbush. 2008. Vegetative and reproductive response of olive cultivars to moderate saline water irrigation. *HortScience* 43: 320-327.