

RIEGO SUPLEMENTARIO CON AGUAS BICARBONATADAS SÓDICAS EN LA REGIÓN PAMPEANA NORTE. IMPACTO DESPUÉS DE 10 AÑOS

Marano Roberto Paulo¹

Introducción

En diversas regiones de Santa Fe se utiliza riego suplementario desde mediados de la década de los '90. La fuente principal de agua empleada es de origen subterráneo, con predominio de iones bicarbonatados-sódicos (Marano, 2000). Esta composición iónica puede provocar potenciales problemas de sodificación de los horizontes superficiales de acuerdo con investigaciones recientes (Andriulo et al. 1998, Caviglia y Paparotti, 2000; Marano y Pilatti, 2002; Pilatti et al 2004). Ello dependerá tanto de la concentración de Na^+ cuanto la dosis neta aplicada después de varios años de riego, independientemente de la concentración de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ o RAS. Esta condición se corrobora con diversos estudios a campo y laboratorio que dan cuenta de una sostenida incorporación de Na^+ a expensas de la acidez de cambio (Ac), antes que un desplazamiento del Ca^{2+} (Marano et al., 2000).

Por otra parte, se aplican dosis de 20 a 30 mm en cada riego, debido a los métodos empleados (aspersión con pivote central o cañón viajero), que penetran no más de 30 cm y son evapotranspirados rápidamente (época estival), resultando una influencia de la calidad del agua en los horizontes superficiales (0 - 15 cm) a causa de una marcada concentración de la solución del suelo en esa zona. En el período de lluvias, el Na^+ acumulado en aquel horizonte puede trasladarse hacia horizontes inferiores si ocurren las siguientes condiciones: 1. Que las precipitaciones sean abundantes; 2. Que se logre desplazar el Na^+ adsorbido en el complejo de intercambio hacia la solución del suelo; 3. Que las condiciones físicas del suelo permitan el movimiento de agua hacia el interior del perfil (drenaje interno). Esta última situación es determinante, ya que en caso contrario, el Na^+ puede ser desplazado del complejo de intercambio hacia la solución del suelo, pero la falta de adecuada conductividad hidráulica impedirá la percolación profunda, siendo nuevamente adsorbido cuando se concentre la solución en la época estival o con la aplicación de nuevas láminas de riego.

Williams y Chartres (1991), citado por Génova (2003), diferenciaron resistencia de resiliencia al expresar: "la magnitud de la disminución de la capacidad de un suelo de funcionar (resistencia, RT) y la tasa de recuperación o la elasticidad (resiliencia, RL) son dos llaves para medir la sustentabilidad". Este último autor propone utilizar ambos indicadores en mediciones de pH, conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_{ex}) y PSI del suelo, para evaluar el grado de sustentabilidad del riego suplementario. A su vez Marano (2004), propone evaluar el grado de sodificación de un horizonte en especial mediante el índice de eficiencia de adsorción de Na^+ (EFNa^+), definido como la relación

¹ Profesor Fac. de Ciencias Agrarias- Universidad Nacional del Litoral- Kreder 2805, Esperanza (3080). TE 03496-420639. int 111 (321) rmarano@fca.unl.edu.ar

entre cantidad de Na^+ adsorbido en un horizonte de suelo respecto a la cantidad total de Na^+ aplicado como riego suplementario en sucesivos años.

Se proponen dos objetivos: 1) desarrollar este nuevo indicador en regiones bajo riego suplementario y 2) verificar la reversibilidad de la sodificación y alcalinización en horizontes superficiales de Molisoles, alcanzada bajo riego suplementario continuo, después de años sucesivos sin riego.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

Para evaluar el índice EFNa^+ se analizaron datos de diferentes sitios irrigados correspondientes a las provincias de Santa Fe (Tabla 1¹) con predominio de Argiudoles, Entre Ríos (Tabla 2²) principalmente Vertisoles (Wilson et al. 2002) y también datos de la serie Pergamino (INTA, 1972) publicados por Andriulo et al. (1998). En Santa Fe se analizaron 3 horizontes: superficial hasta 7 cm; subsuperficial hasta 30 cm e inicio del B hasta 45 cm. Para Entre Ríos fue superficial hasta 12 cm y Pergamino hasta 20 cm. También se analizaron datos obtenidos en experimentos de laboratorio en columnas perturbadas de horizontes superficiales de suelos Argiudoles del centro de Santa Fe (Marano et al. 1999, 2004).

Cada sitio fue regado con aguas de diferente calidad química (tablas 2 y 3) durante un número variable de años sucesivos. Entre Ríos se caracteriza por riego por inundación, propio del cultivo de arroz y Santa Fe predomina aspersión (pivote central y cañón viajero).

El cálculo de EFNa^+ se realizó con los datos obtenidos en cada uno de los sitios regados, sustrayendo la cantidad de Na^+ correspondiente al lote de secano que fue utilizado como testigo. La cantidad de Na^+ se calculó a partir de los milímetros totales aplicados en cada sitio. Se utilizaron regresiones entre valores de EFNa^+ y RAS, esta última ajustada según Bower (Ayers y Westcot 1976) para las aguas de Entre Ríos y según Suárez (Ayers y Westcot 1987) para las de Santa Fe. También se relacionó EFNa^+ con el Na^+ total aplicado.

En cuanto al segundo objetivo, se analizó como estudio de caso un lote ubicado en la localidad de Llambi Campbell, Santa Fe (Lat 31° 11' 20" y Long 60° 45' 55"), con una historia agrícola muy intensa, remontándose a más de 40 años de agricultura continua, con labranza tradicional de arado de reja y rastra de discos. Las condiciones climáticas se evaluaron con datos de la serie histórica de la estación meteorológica más cercana (Santa Fe), resultando los promedios de precipitación (P) -desde 1901 a 2007- y evapotranspiración potencial (EP) -según el método de Thornthwaite (Cáceres, 1980)- 993 mm y 962 mm respectivamente. Sin embargo, entre 2002 y 2006 el promedio de precipitación anual fue 1245 mm (25 % mayor al valor histórico), con el 80% de la lluvia anual concentrada entre los meses de noviembre a mayo. El suelo correspondiente es un

¹ Datos obtenidos a partir del proyecto PICT 08-04869 BID 802 OC AR (Secretaría de promoción Científica y Tecnológica de la Nación).

² Datos obtenidos con el Proyecto FonCYT "Sustentabilidad del cultivo de arroz en la Provincia de Entre Ríos". Facultad de Ciencias Agropecuarias-Universidad Nacional de Entre Ríos.

Argiudol ácuico, serie Humboldt, de textura franco-limosa en los primeros 25 cm (Ap) y franco-arcillolimosa (Bt) hasta 60 cm. Para este trabajo se decidió considerar sólo el horizonte A, dividiéndolo en dos partes: Ap, de 0 a 15 cm y A₂, de 15 a 26 cm.

Tabla 1 : Características principales de los casos estudiados en la Pcia de Santa Fe.

Localidad Ubicación en Santa Fe	Tratamientos	Lámina total aplicada (mm)	Sistema de riego	Suelo
Hughes Sur	1) Secano 2) 3 años con riego 3) 30 años con riego	2) 260 mm 3) 1300 mm	2) Pivote 3) 5 años en surco + 25 años con pivote	Hapludol típico, serie Santa Isabel
Santa Emilia Sur	1) Secano 2) 4 años con riego 3) 8 años con riego	2) 600 mm 3) 1050 mm	2) Pivote 3) Surco (650 mm) y pivote (400 mm)	Argiudol típico, serie Chovet
Bombal Sur	1) Secano 2) 3 años con riego	2) 200 mm	Pivote central	Argiudol típico serie Chabás
Monje 1 Este	1) Secano 2) Riego 3) Inundación	2) 400 mm 3) > 1000 mm	2) Aspersión 3) Inundación	Argiudol típico serie Maciel
Monje 2 Este	1) Secano 2) Riego	500 mm	Surco	Argiudol típico serie Arocena
Manucho 1 Centro	1) Secano 2) Riego	650 mm	Cañón viajero	Argiudol típico serie Rincón de Ávila
Manucho 2 Centro	1) Secano 2) Riego	600 mm	Cañón viajero	Argiudol ácuico, serie Constituyente
Llambi Campbell 1 Centro este	1) Secano 2) Riego	970 mm	Pivote central	Argiudol ácuico serie Humboldt
Llambi Campbell 2 Centro este	1) Secano 2) Riego	250 mm	Pivote central	Argiudol típico serie Rincón de Ávila
Marcelino Escalada Centro este	1) Secano 2) Riego	400 mm	Pivote central	Argiudol ácuico, serie Angeloni
Reconquista Noreste	1) Secano 2) Riego	400 mm	Pivote central	Argiudol típico

El acuífero explotado se denomina "Formación Puelche" (INCyTH 1975), constituido por arenas cuarzosas. El equipo de riego es un pivote central móvil, con capacidad de 100 m³h⁻¹ de acuerdo a las pruebas de bombeo, utilizando las esquinas del lote para el muestreo de secano. La calidad del agua utilizada para riego se presenta en la tabla 3 (Llambi Campbell 1). Predominan iones bicarbonatados sódicos, aunque los valores de carbonato de sodio residual (CSR) no son tan elevados, siendo el valor de la RAS uno de los más bajos del centro-este santafesino (Marano, 2000).

El riego comenzó en 1995 aplicándose, en seis años consecutivos, un total de 970 mm, suspendiéndose a partir de 2001. Durante la época de riego se cultivó maíz para silo en los primeros tres años, siguiendo los otros tres con alfalfa, manteniendo luego este cultivo.

Tabla 2 : Características principales de los casos estudiados en la Pcia de Entre Ríos.

Sitio	Nº años riego	Dosis total aplicada (mm)	Sitio	Nº años riego	Dosis total aplicada (mm)
Jubileo	Secano		La Isleta	2,5	113
Jubileo	1,0	63	La Isleta	2,5	113
Jubileo	2,0	126	La Isleta	2,5	113
Jubileo	4,2	3780	San Pedro	secano	
Jubileo	7,0	441	San Pedro	0,5	450
Lucas Norte	secano		San Pedro	0,7	32
Lucas Norte	1,0	45	San Pedro	1,9	84
Lucas Norte	1,7	1500	San Pedro	2,1	96
Lucas Norte	2,0	90	Arroyo Barú	secano	
Lucas Norte	3,0	135	Arroyo Barú	1,1	82
Herrera	Secano		Arroyo Barú	2,7	2400
Herrera	2,1	96	Arroyo Barú	5,3	384
Villa Mantero	secano		Arroyo Barú	6,4	461
Villa Mantero	1,4	64	Campo Alvarez	secano	
Villa Mantero	2,1	96	Campo Alvarez	1,3	1125
Villa Mantero	2,1	96	Campo Alvarez	2,2	100
La Isleta	secano		Campo Alvarez	2,5	113
La Isleta	1,7	75	Campo Alvarez	3,3	150

A efectos de analizar cuáles cationes aumentaron y cuáles disminuyeron en el período con riego, se procedió a realizar el cálculo de las diferencias entre cationes (DC) para los horizontes Ap y A2 y luego la diferencia ponderada (DP) de ambos horizontes (26 cm). Este cálculo fue hecho para dos situaciones: a) para la zona irrigada respecto a la de secano en cada época y b) considerando secano y riego de modo individual para épocas sucesivas y para la 1ª y 4ª época de muestreo.

Tabla 3 : Características químicas de las aguas correspondientes a los casos estudiados en la Pcia de Santa Fe.

Sitio	pH	CE dS m ⁻¹	Na mmol _c L ⁻¹	Ca mmol _c L ⁻¹	Mg mmol _c L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mmol _c L ⁻¹	RAS	RAS ajustado	CSR	PS %
Hughes	7,2	1,7	19,4	0,5	0,7	15	25,0	28,5	13,8	95
Santa Emilia 1	8,1	0,9	11	0,05	0,7	11,2	18,2	18,9	10,5	99
Santa Emilia 2	7,8	0,9	10,6	0,3	0,4	10,8	17,9	20,2	10,1	98
Bombal	7,3	2,2	23,1	1,5	2,8	ND	15,8	18,0	7,2	88
Monje 1	8,1	1,2	13,1	1,2	0,7	11,8	13,4	17,2	9,9	91
Monje 2	7,9	1,3	14,9	0,6	0,5	12,2	20,1	23,8	11,1	96
Manucho	6,9	0,7	2,8	2,9	0,8	6,0	2,1	2,8	2,3	43
Llambi Campbell 1	8,3	0,9	6,6	1,3	0,8	4,4	6,4	7,0	2,3	61
Llambi Campbell 2	7,7	0,8	7,3	1,1	0,5	4,2	8,2	9,0	2,6	76
Marcelino Escalada	7,7	1,3	12,5	0,5	0,3	9,2	19,8	23,2	8,4	80
Reconquista	7,7	0,5	1	4,1	0,9	4,8	0,6	0,9	-0,2	17
Santa Clara 1	8,5	1,7	16,6	0,6	0,4	12,5	24	29	14	93
Santa Clara 2	9,2	2,5	23,6	0,6	0,1	8,3	40	50	11	94

Se realizó un balance entre las DC adsorbidos en los horizontes superficiales y los cationes aportados por el agua de riego (CAR). Relacionando las DC adsorbidos en el complejo de intercambio con los CAR, se utilizó el índice EFNa⁺. En el período sin riego, se realizó

igual procedimiento de cálculo de DC entre la 5ª y 4ª época de muestreo, y también se realizó el balance de cationes entre los sitios de secano y de riego.

Tabla 4 : Características químicas de las aguas correspondientes a los casos estudiados en Entre Ríos.

Sitio	pH	CE dS m ⁻¹	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	Ca ²⁺ mmol _c L ⁻¹	Mg ²⁺ mmol _c L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mmol _c L ⁻¹	RAS	RAS ajustado	CSR	PS %
Jubileo	6,8	0,76	5,5	2,9	0,2	7,0	4,4	9,6	3,9	62
Lucas Norte	6,9	0,8	7,0	1,0	0,4	6,8	8,5	14,5	5,4	78
Herrera	6,9	0,67	4,0	2,6	0,8	6,5	3,0	6,7	3,0	52
Villa Mantero	6,4	0,66	4,5	3,4	0,4	6,8	3,3	7,1	2,9	55
La Isleta	7,4	0,82	8,3	1,7	0,5	7,5	7,9	15,5	5,3	82
San Pedro	6,9	0,59	4,3	2,1	0,2	6,5	4,0	8,2	4,2	62
Arroyo Barú	6,6	0,77	4,0	2,6	1,2	8,0	2,9	6,5	4,2	47
Campo Alvarez	6,8	0,7	4,8	2,2	0,4	6,5	4,2	8,6	3,9	61

Resultados y Discusión

Índice de eficiencia de adsorción de Na⁺

De acuerdo a los resultados se presentan dos grandes grupos. El primero, con aplicaciones de hasta 1500- 2000 kg Na⁺ ha⁻¹, no tiene tendencia definida y hay una gran dispersión de datos. En el segundo grupo, con aplicaciones de Na⁺ mayores, hay tendencia a una disminución de la EFNa⁺ del horizonte superficial, aún para diferentes tipos texturales de suelos (Figuras 1a y 1b), con valor máximo (en ambas regiones) de 0,3 para una aplicación de 1000 a 1500 kgNa⁺ha⁻¹.

Para Pergamino, con 11 años sucesivos de riego hasta 1997, el valor de EFNa⁺ en 20 cm. fue de 0,26 con 4637 kgNa⁺ha⁻¹ (Andriulo et al., 1998) y disminuyó dos años después a 0,1 debido a las intensas precipitaciones de 1998 (Sasal et al.2000). Dado que la cantidad de Na⁺ aplicado con el riego se distribuye en todo el perfil del suelo, en la medida que en el horizonte superficial el valor de EFNa⁺ disminuye, indicaría una capacidad límite de adsorción de Na⁺. Este límite también depende de la continuidad de años bajo riego y la secuencia de precipitaciones. Al respecto debe indicarse que el sitio con mayor número total de años de riego (Hughes) aplicó sólo 1300 mm desde 1970, debido a una secuencia de años más secos que el promedio, donde se utilizó riego a razón de 100 a 130 mm año⁻¹ seguidos de años más húmedos, resultando una relación de 0,6 (3 veces cada 5 años). De acuerdo a antecedentes de este sitio, el PSI en superficie alcanzó valores máximos de 9% y en al menos dos oportunidades disminuyó, por efecto de lluvias extraordinarias, hasta alcanzar valores de 4-5%.

Continuando el análisis con horizontes superficiales, en condiciones de laboratorio, experimentando con un Argiudol no laboreado y con aguas de RAS creciente, Marano et al. (2004) observaron un sostenido incremento de la sodificación, con valores de EFNa⁺ muy elevados- aunque independientes de la RAS- y una disminución importante luego de la aplicación de una significativa cantidad de lluvia (Figura 4) similar a lo ocurrido en 1998 en condiciones de campo. Los valores finales de EFNa⁺ de este experimento (entre 0,3 y

0,4) se hallan muy por encima de los resultados de campo. De la figura 4 se destaca que la sodificación alcanzada con agua de RAS 6 fue completamente revertida por el lavado.

Otros datos de $EFNa^+$ en horizontes superficiales, obtenidos en laboratorio, corresponden a los sitios Santa Clara 1 (Argiudol ácuico) y Santa Clara 2 (Natracualf típico). Se experimentó con aguas salino-sódicas alternando láminas de riego -230 mm- y de lluvia -95 mm- (Marano et al., 1999). Santa Clara 1 tuvo mayores valores de $EFNa^+$ -0,44 de 0 a 10 cm y 0,25 de 10 a 30 cm- que Santa Clara 2 -0,11 de 0 a 10 cm mientras que de 10 a 30 cm la concentración de Na^+ disminuyó después del riego-, a pesar de la mayor cantidad de Na^+ aplicado en el último caso. Este comportamiento puede ser considerado atípico comparando un sitio (Argiudol ácuico) respecto al otro (Natracual típico), aunque analizando la Figura 1 y para 5000 kg ha^{-1} de Na^+ que se aplicó en Santa Clara 2, el valor de $EFNa^+$ es similar al encontrado en Pergamino (aproximadamente 0,1). Para el caso de Santa Clara 1, es de esperar una disminución de la $EFNa^+$ con un aumento de la fracción de lavado.

La relación entre $EFNa^+$ y la RAS ajustada indicaría una tendencia decreciente para el caso de Santa Fe, aunque el bajo coeficiente R^2 no permite inferir un mayor análisis (Figura 2). Para Entre Ríos no se observa una tendencia definida (Figura 3).

Resta analizar los horizontes B donde hubo mediciones, esto es en Santa Fe. De todas las series, Hughes presenta el menor contenido de arcilla, teniendo el resto un Bt potente. La tendencia es similar a los horizontes superficiales, es decir hasta el umbral 1500- 2000 kg $Na^+ ha^{-1}$ existe dispersión de datos y luego una tendencia decreciente de la $EFNa^+$, indicando una posible saturación de este ión en dicho horizonte. El mayor valor de $EFNa^+$ es más alta que en los horizontes superficiales (0,4) debido probablemente a los mayores contenidos de arcilla que presenta el Bt.

La tabla 5 presenta los valores de $EFNa^+$ de todo el perfil para suelos de Santa Fe, ordenada en función de las mayores cantidades de Na^+ aplicado. Hughes (riego nuevo) tiene mayor $EFNa^+$ que Hughes (riego viejo), coincidiendo con la tendencia de disminuir ésta con la cantidad de Na^+ aplicado. Similar situación ocurre con Santa Emilia entre el riego con mayor número de años. Estos sitios corresponden a suelos ubicados en el sur de Santa Fe, con mayor contenido de MO y menor contenido de arcilla (Pilatti et al., 2003). El resto de los sitios que presentan valores de $EFNa^+$ entre 0,8 y 1, tienen menor MO, horizontes Bt más arcillosos y una estructura degradada por muchos años de agricultura continua, aspectos todos que dificultan el drenaje interno. En consecuencia es más difícil percolar el Na^+ que logra ser lixiviado por las precipitaciones por debajo del horizonte Bt.

En el experimento de laboratorio donde pudo manifestarse disminución de $EFNa^+$ se aplicaron fuertes láminas de lavado, además de no existir ningún impedimento para que el Na^+ desadsorbido pudiese eliminarse del perfil, corroborando la hipótesis que fuertes lluvias pueden eliminar Na^+ del complejo de intercambio. El otro experimento de laboratorio tuvo valores de $EFNa^+$ en superficie más altos que condiciones de campo, para suelos y aplicaciones de Na^+ similares (Tabla 5), debido probablemente a que la relación de lixiviación no fue suficiente como para producir un desplazamiento del Na^+ .

Una utilidad de este nuevo indicador podría ser estimar el incremento de PSI que alcanzarían distintos horizontes de un suelo a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta PSI = \frac{10 EFNa^+ LR Na_r}{CIC \rho_s P_r} \quad (1)$$

ΔPSI : incremento PSI, en porcentaje.

LR : Lámina de riego, en mm.

Na_r : Concentración de Na^+ en el agua de riego, en $mmol_c L^{-1}$.

CIC: Capacidad de intercambio catiónico, en $cmol_c kg^{-1}$.

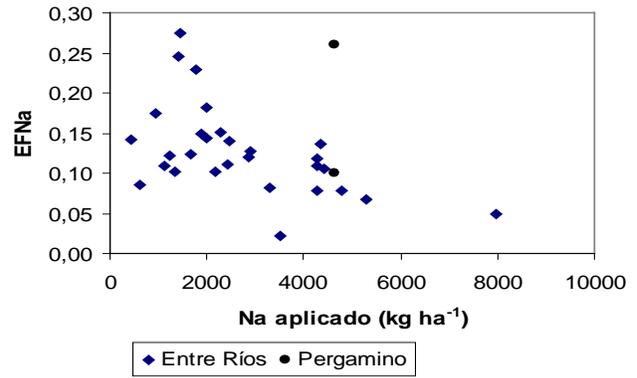
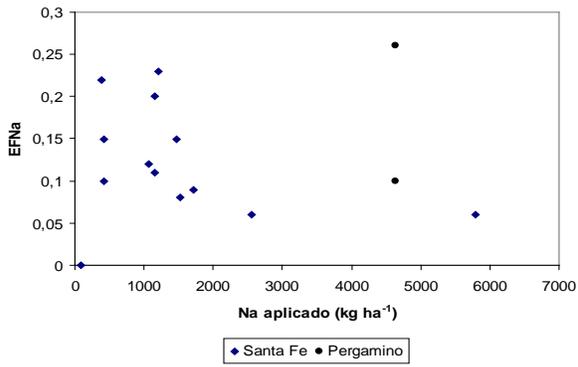
ρ_s : Densidad de suelo, en $kg m^{-3}$.

P_r : Profundidad del horizonte, en m

Tabla 5: Eficiencia de adsorción de Na^+ en los primero 45 cm y cantidad total Na^+ aplicado con el riego en tres horizontes de suelos de Santa Fe.

Sitio	Na^+ aplicado $kg ha^{-1}$	Distribución % del Na^+ en profundidad				EF Na^+
		0-7	7-35	35 – 45	> 45*	
Hughes (Riego viejo)	5801	6	21	3	70	0,30
Santa Emilia (Riego 8 años)	2560	6	30	5	59	0,41
Monje 2	1714	9	60	20	11	0,89
Santa Emilia (Riego 4 años)	1518	8	45	4	43	0,57
Llambi Campbell 1	1472	15	76	6	3	0,97
Monje 1	1205	23	64	13	0	1,00
Hughes (Riego nuevo)	1160	20	30	5	45	0,55
Marcelino Escalada	1150	19	37	24	20	0,80
Bombal	1063	12	32	40	16	0,84
Llambi Campbell 2	420	15	41	15	29	0,81
Manucho 1	419	10	61	22	7	0,93
Manucho 2	386	22	22	32	24	0,76
Reconquista	92	0	93	7	0	1,00

* obtenido por diferencia entre el aplicado y el presente de 0 a 45 cm.



Figuras 1a y 1 b: Eficiencia de adsorción de Na⁺ y cantidad de Na aplicado con el riego (kg ha⁻¹) para horizontes superficiales en suelos de Santa Fe, Entre Ríos y Pergamino.
1 a Santa Fe.

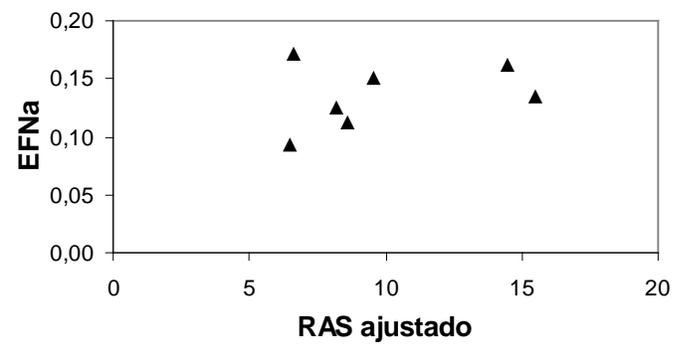
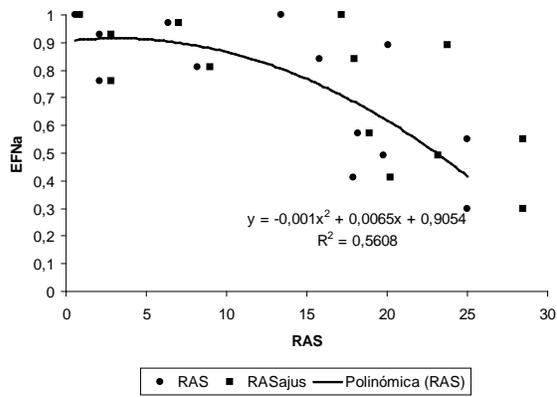


Figura 2: Valores de Eficiencia de adsorción de Na⁺, RAS y RAS ajustado en suelos de Santa Fe.

Figura 3: Valores de Eficiencia de adsorción de Na⁺, RAS y RAS ajustado en suelos de Entre Ríos.

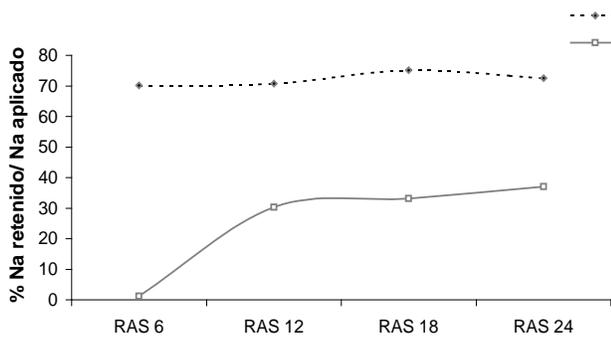


Figura 4: Valores de Eficiencia de adsorción de Na⁺ y RAS en dos momentos del experimento realizado en laboratorio sobre un Argiudol de Santa Fe.

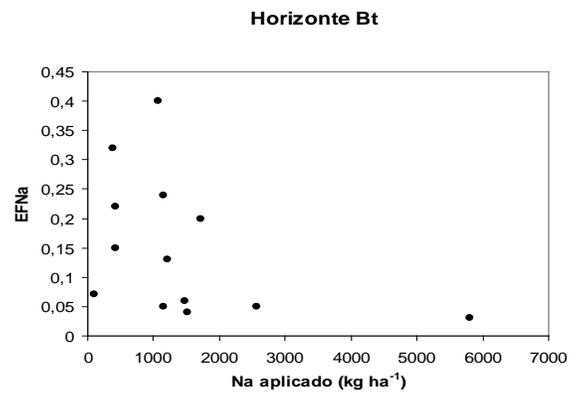


Figura 5. Eficiencia de adsorción de Na⁺ y cantidad de Na⁺ aplicado con el riego (kg ha⁻¹) para horizontes Bt en suelos de Santa Fe.

Estudio de Caso: I Alcalinización y sodificación

Los resultados de pH, cationes intercambiables, AC y CIC en condiciones de riego y seco, para las cinco épocas de muestreo, se presentan en la Tabla 6. En los primeros tres años de riego hubo un fuerte aumento de pH y de Na^+ en el suelo bajo riego respecto al de seco, para ambos horizontes (Figura 6). En la 2ª época, la diferencia de pH (A_p) entre ambos sitios se incrementó un 100% respecto a la 1ª, aunque no se debió tanto a un aumento en el sitio con riego –que prácticamente se mantuvo igual en ambos horizontes- sino a una disminución importante de pH en seco (Figura 6). El origen de esta acidificación se puede encontrar en las importantes lluvias ocurridas entre ambas fechas (en marzo llovió 272 mm, cuando el promedio es 145 mm). Las precipitaciones abundantes provocan dilución de la solución del suelo y en consecuencia un aumento del espesor de la doble capa difusa; por lo que para mantener el equilibrio ingresa H^+ desde la solución, aumentando la proporción de OH^- y del pH. Posteriormente se restablece el equilibrio de H^+ entre la solución del suelo y la doble capa, resultando finalmente un pH más bajo.

Igual situación ocurrió con el Na^+ , dado que el sitio con riego tuvo un fuerte incremento en los tres primeros años, siendo aún mayor en el horizonte subsuperficial (Tabla 6). En la 2ª época disminuyó el contenido de Na^+ tanto en riego como en seco, aunque en mayor proporción en este último (100 % respecto a la 1ª), mientras que en riego la disminución sólo fue en A_2 (130%) ya que el horizonte A_p se mantuvo con el mismo tenor (Figura 6). Como se mencionó anteriormente, la disminución en la concentración de Na^+ está originada en las precipitaciones extraordinarias, dado que -si la permeabilidad del suelo es adecuada- hay lixiviación de sales solubles (HCO_3Na).

Entre la 2ª y 3ª fecha siguió incrementándose el Na^+ en el sitio con riego (Tabla 6), especialmente en el horizonte subsuperficial, que en el muestreo anterior había disminuido fuertemente. Esta situación indicaría, por un lado una cierta “capacidad de saturación” de Na^+ del horizonte A_p y por otro serias restricciones al movimiento de agua del A_2 , originadas en la estructura degradada por muchos años de agricultura convencional (pie de arado) y proximidad del horizonte textural (Bt). Entre estas fecha no hubo cambios en seco (Figura 6).

Finalmente, en la cuarta y última fecha del período con riego no hubo cambios de Na^+ en ninguno de los horizontes, alcanzando el PSI un valor cercano a 10 (Tabla 6). Marano (2000), utilizando columnas en laboratorio, halló valores de Na^+ -en equilibrio con aguas de calidad idéntica a las de este trabajo- de $1,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (PSI 10) para suelos de similares características (A_p degradado). Éste sería entonces el PSI de equilibrio para las condiciones de riego suplementario con aguas de RAS 6, a la vez que podría ser considerado como máximo permitido.

En el período sin riego se destaca un fuerte descenso en la concentración de Na^+ , tanto en el área de seco como irrigada, alcanzando un equilibrio entre ambas en A_p , no así en A_2 , donde persiste una diferencia de aproximadamente el doble de Na^+ (Tabla 6). Los resultados mencionados indican una fuerte desorción de Na^+ , explicadas por la ausencia de riego y aumento de las lluvias, que entre la 5ª y 4ª fecha se incrementó un 25% respecto al promedio histórico del área.

Considerando la cantidad de Na^+ aplicado durante el período de riego (970 mm) y adsorbido en los 26 cm del horizonte superficial, resulta un aporte de **1,52 kg Na^+ ha^{-1} por cada mm aplicado y una EFNa^+** de 0,53. Por otra parte, durante el período sin riego, este valor se redujo a 0,11.

Durante este período también se produjo un descenso del pH, de 0,6 unidades en secano (ambos horizontes) y entre 1,1 (A_p) y 0,5 (A₂) en el área irrigada.

Diferentes autores encontraron incrementos de Na⁺ y pH debido al uso de aguas bicarbonatadas sódicas, en Argiudoles de la región pampeana bajo riego suplementario (Andriulo et al., 1998; Andriulo et al., 2000; Caviglia y Papparotti, 2000; Wilson et al., 2002; Pilatti et al., 2004). En menor medida se evaluó la reversibilidad del Na⁺ y pH por diferentes medios (lluvia o enmiendas). Sasal et al. (2000), realizaron ensayos en Pergamino en suelos sodificados y alcalinizados por riego, utilizando enmiendas de yeso y cobertura de rastrojos, entre 1997 y 1999. Encontraron una disminución de Na⁺, incluso en lotes testigo, atribuido a las precipitaciones excepcionales de 1998, aunque no hubo disminución de pH. Por otra parte, Génova (2003) plantea la resistencia y resiliencia de Argiudoles de la región pampeana, concluyendo que a mayor contenido de RAS del agua de riego, mayor aumento del PSI durante la época de riego, disminuyendo luego debido a las precipitaciones. Marano et al. (2004), en experimentos de laboratorio realizados con Argiudoles del centro de Santa Fe, hallaron reversibilidad del Na⁺ adsorbido en el complejo de intercambio –en equilibrio con aguas de RAS 6- luego de 390 mm de lluvia, aunque con la desodificación lograda se mantuvo una significativa disminución de la conductividad hidráulica. Los autores destacan que con aguas de RAS > 6, esa cantidad de lluvia no fue suficiente para revertir el PSI alcanzado, sin analizar los cambios en el pH del suelo.

Estudio de Caso: II Reemplazo catiónico

Dado que aumentó la concentración de Na⁺, se debe analizar qué cationes fueron desplazados.

Analizando en conjunto Ca²⁺ + Mg²⁺, sus concentraciones fueron variables a lo largo de las diferentes épocas (Tabla 6, Figura 6), aunque no se correspondieron con los cambios introducidos por el agua de riego. Esta tendencia también fue hallada por diferentes autores (Sasal et al., 2000; Marano, 2000; Pilatti et al., 2004) Los valores en todas las épocas oscilaron entre 8,4 a 14,4 cmol_c kg⁻¹, disminuyendo 2 a 6 cmol_c kg⁻¹ luego de períodos de lluvias abundantes (1998 y 2003).

En cambio existe una alta correlación entre la disminución de Ac y el aumento de Na (r=-0,76, Figura 7), indicando que la Ac fue el principal catión desplazado. Considerando el intervalo de pH de 5,5 a 7, donde se encuentran comprendidos los principales suelos de la región, el ión Al(OH)₂(O₂H)₄⁺ sería la especie más abundante, con una carga positiva (Marano, 2000). Por otra parte, la fracción húmica coloidal del complejo de intercambio contiene grupos carboxílicos suficientemente ácidos como para disociarse a un pH < 6 (Bohn et al. 1993), representado por R – COOH = R-COO⁻ + H⁺. Resumiendo, la Ac en parte se debe a la fracción mineral y en parte a la orgánica. En cuanto al método analítico que se utilizó en el presente trabajo para la determinación de Ac, fueron determinados iones de especies polimerizadas de aluminio junto con iones de H⁺ resultantes de la disociación de los diferentes ácidos húmicos presentes en la materia orgánica, sin capacidad de distinguir la proporción de uno u otro. Estos cationes tienen menor energía de adsorción que el Ca²⁺ o el Mg²⁺, y por ende son los primeros en ser desplazados cuando se produce sodificación.

Tabla 6: Valores de cationes intercambiables y CIC correspondiente a la zona de secano y riego para las cinco épocas de muestreo.

Condición	1 ^a -Febrero 1998				2 ^a - Setiembre 1998				3 ^a - Setiembre 1999			
	Secano		Riego		Secano		Riego		Secano		Riego	
Horizonte	Ap	A ₂	Ap	A ₂	Ap	A ₂	Ap	A ₂	Ap	A ₂	Ap	A ₂
pH	6,9	6,4	7,7	6,8	6,0	6,3	7,6	6,8	6,3	6,5	7,8	7,5
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	12	13,6	14	14,4	8,4	9,6	9,4	10,6	12,0	13,0	12,3	13,1
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,8	0,7	1,4	2,1	0,4	0,3	1,3	0,9	0,4	0,3	1,4	1,6
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	1,1	0,9	1	0,9	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
Ac (cmol _c kg ⁻¹)	4,2	3,3	1,7	3,2	3,9	3,9	1,9	1,9	2,6	3,2	0,8	0,4
CIC suma (cmol _c kg ⁻¹)	18,1	18,5	18,1	20,6	13,3	14,4	13,3	14	15,6	17,1	15,2	15,8
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	17,4	17,6	16,6	16,4	13	14,2	12,8	13,2	14,2	14,9	13,8	15,5
PSI	4,6	4	8,4	10,5	3,0	2,1	9,8	6,4	2,6	1,7	10,2	10,5

Tabla 6: continuación

Condición	4 ^a - Enero 2001				5 ^o - Octubre 2007			
	Secano		Riego		Secano		Riego	
Horizonte	Ap	A ₂	Ap	A ₂	Ap	A ₂	Ap	A ₂
pH	6,3	6,5	7,7	7,5	5,7	5,9	6,6	7
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	12	13	11,5	13,1	10,5	10,6	9,5	11,2
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,4	0,3	1,2	1,6	0,2	0,4	0,2	0,9
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,6	0,5	0,4
Ac (cmol _c kg ⁻¹)	2,6	3,2	0,8	0,4	6,7	6,6	4,4	4,9
CIC suma (cmol _c kg ⁻¹)	15,6	13,9	13,4	15,4	11,6	11,6	10,2	12,5
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	14,2	14,9	13,3	15,5	14,2	14,8	13,3	12,8
PSI	3	2	9	10	1,4	2,7	1,5	7,0

En el área irrigada, al finalizar el período de riego, la Ac disminuyó considerablemente en ambos horizontes, recuperándose después de varios años sin regar a valores similares a los sitios de secano (Tabla 6). Se evidencia que las precipitaciones producen las condiciones propias de la acidificación de los suelos, antes que la pérdida de bases por la extracción de los cultivos.

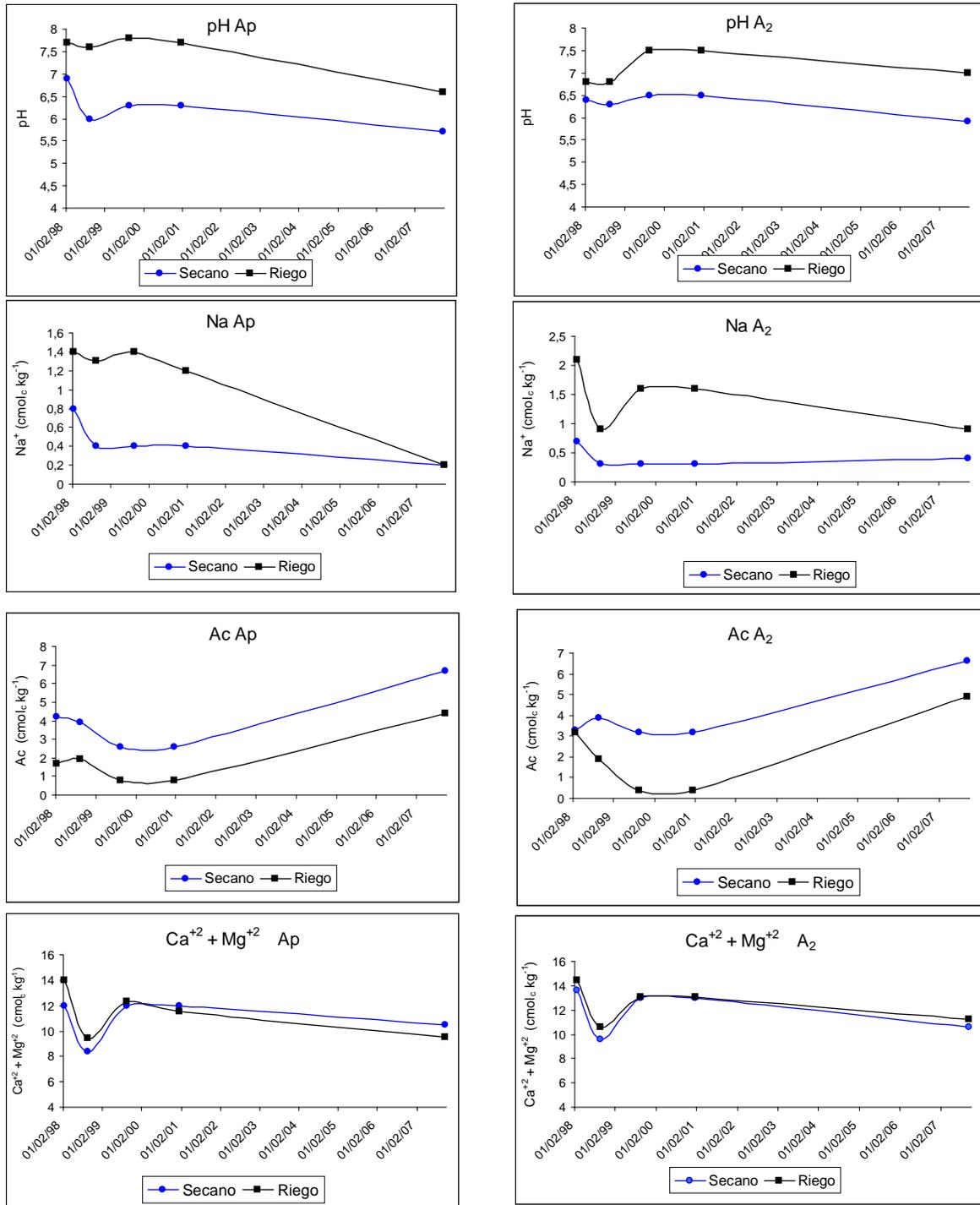


Figura 6: Evolución del pH, Na⁺, acidez de cambio (Ac), Ca²⁺ y Mg²⁺ en los horizontes Ap y A₂ de Argiudoles del centro santafesino con seis años consecutivos bajo riego suplementario, seguidos de otros seis años sin riego.

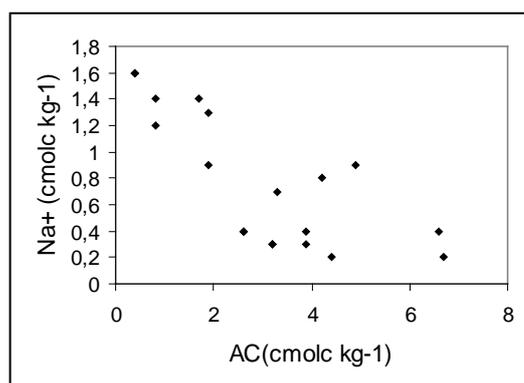


Figura 7: Evolución de la acidez de cambio (Ac) con la concentración de Na⁺

CONCLUSIONES

- ◆ Con aguas bicarbonatadas sódicas se produce un fuerte incremento en el PSI del suelo durante varios años continuos bajo riego, independientemente del valor de la RAS.
- ◆ El índice EFNa⁺ es un indicador del riesgo de sodificación de un suelo, considerando el mediano y largo plazo, que debe utilizarse conjuntamente con la cantidad total de Na⁺ aplicado. Este último permite estimar además el número de años consecutivos de riego suplementario que se puede emplear en cada sitio.
- ◆ Igualmente el pH tuvo un aumento sostenido en el suelo durante el período bajo riego, disminuyendo cuando se dejó de regar, por las mismas causas.
- ◆ La Ac fue el principal ión desplazado por el Na⁺ durante los años con riego, y el que más fuertemente aumentó en el período sin riego.
- ◆ En regiones húmedas la EFNa⁺ de los horizontes superficiales disminuye cuando se producen lluvias importantes y el suelo tiene buen drenaje interno. Valores de EFNa⁺ superiores a 0,8 se presentan en suelos franco-limosos o franco-arcillosos, indicando una relación con la textura.
- ◆ Con 1472 kg Na⁺ ha⁻¹ aplicados en seis años se habría alcanzado un equilibrio entre la RAS del agua de riego y el PSI del suelo. Posteriormente, lluvias anuales de 1245 mm en promedio, permitieron revertir el incremento de Na⁺ y pH.
- ◆ El análisis de mayor cantidad de sitios bajo riego en diferentes tipos de suelos y ambientes podrá ajustar valores de EFNa⁺ apropiados y con ello estimar el PSI final de equilibrio.

BIBLIOGRAFIA

- Andriulo A, Galetto ML, Ferreyra C, Cordone C, Sasal C, Abgrego F, Galina J, Rimatori F. 1998. Efectos de once años de riego complementario sobre un argiudol típico pampeano. Revista de la A. A. C. S. 16-2:125-127.
- Andriulo A, Galetto ML, Sasal C, Abgrego F, Bueno M, Rimatori F, de la Cruz MA. 2000. Efecto del riego complementario con aguas salino sódicas sobre algunas propiedades del suelo en el sudoeste santafesino. Resúmenes XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, 11-14 abril.
- Ayers R S, Westcot W. 1976. La calidad del agua en la Agricultura. Serie FAO Riego y Drenaje N° 29. Roma, Italia. 85 pp.
- Ayers R S, Westcot W. 1987. La calidad del agua en la Agricultura. Serie FAO Riego y Drenaje N° 29 rev 1. Roma, Italia. 174 pp.

- Cáceres L M. 1980. Caracterización climática de la Prov. de Santa Fe. Min. Agr. y Gan., D.G. Suelos y Aguas. 35 pp.
- Caviglia O P, Paparotti O F. 2000. Efecto del uso de aguas de riego de calidad dudosa sobre algunas propiedades químicas del suelo en el centro oeste de Entre Ríos. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Instituto Nacional De Ciencia y Técnica Hídricas. 1975. Convenio Argentino Alemán de Agua Subterránea. Recursos de Agua Subterránea y su Aprovechamiento en la Llanura Pampeana y en el valle del Conlara. Tomo 1, Buenos Aires.
- INTA 1972. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3360-32 Pergamino
- Génova, L. 2003. Resistencia y resiliencia de suelos pampeanos a la degradación salina y sódica, disturbados por riego complementario. Revista Facultad de Agronomía. 23 (2-3) Buenos Aires. p.119-130.
- Marano R P, Pilatti M A, Orellana J A de. 1999. Estudio del efecto de la calidad del agua subterránea para riego, en el centro de Santa Fe, sobre propiedades del suelo mediante simulación física. Ed. Trineo, A. Hidrología Subterránea- 1999- Serie de correlación geológica 13: 89-90.
- Marano R P. 2000. Posibles efectos de la calidad de las aguas subterráneas con fines de riego suplementario en suelos de la región centro-este santafesina. Tesis de Ms. Sc. Fac. Cs. Agrarias, Univ. Nac. Cuyo. 135 p.
- Marano R. y M. Pilatti. 2002. "Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en molisoles de Santa Fe. 3) Estudio de caso: Degradación físico-química de un Argiudol en el centro este santafesino". Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, 16-19 de abril.
- Marano R. 2004. Propuesta de un nuevo indicador de peligrosidad de aguas bicarbonatadas sódicas en suelos bajo riego suplementario. Resúmenes XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, p 320.
- Marano R., Herzog E., Pilatti M., Imhoff S. 2004. Tenor crítico de sodio intercambiable para evaluar el deterioro físico de un Argiudol y su reversibilidad con agua de lluvia. Resúmenes XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, p 319.
- Oster J D, Shainberg I, Abrol I P. 1996. Reclamation of Salt-Affected Soil cap 14, in Soil Erosion Conservation, and Rehabilitation, editado por Menachem Agassi, New York. Basel.Hong Kong.
- Pilatti, M.A., Marano, R.P y Orellana, J.A de. 2004. Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Molisoles de Santa Fe Sodificación y alcalinización. Agrochimica XLVIII (5-6): 233-248
- Quirk J.P., Schofield R.K., 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. J. Soil Sci. 6: 163-178.
- Richards L A (Ed.). 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Dep. de Agricultura de los EE. UU. de América. 172 pp.
- Sasal C, Andriulo A, Galetto M, Ferreyra C, Abrego F, Bueno M, Rimatori F, Cruz M de la. 2000. Efecto de la cobertura y de dos niveles de yeso sobre un suelo sodificado por riego complementario. Actas XVII CACS, Mar del Plata, 11-14 Abril.
- Wilson M., Cerana J., Valenti R., Díaz E., Duarte O., De Batista J., Rivarola S. y Benavides R. 2002. Evaluación de la calidad del agua para riego en el área arroceras de Entre Ríos. Cuadernos del CURIHAM. 8(1):31-39.