

**CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA CON FINES DE RIEGO
SUPLEMENTARIO EN ARGIUDOLES DEL CENTRO DE SANTA FÉ,
ARGENTINA**

**Quality of ground water used for supplementary irrigation
on Argiudolls of central Santa Fe, Argentina**

Ester Ruda¹, Adriana Mongiello¹, Adriana Acosta¹, Ester Ocampo¹, Liliana Contini²

ABSTRACT

Considering that the ground water used for supplementary irrigation has variable chemical characteristics that may affect soil properties, a typical Argiudoll (A_1) and an aquic Argiudoll (A_p) were treated with artificial irrigation waters with different sodium adsorption ratios (RAS): 6.3, 11.0, 16.5, 21.5 and 24.3. The following tests were carried out: carbon (Walckey Black); pH (1:2.5) (by pHmeter); cation exchange capacity (CIC); Ca^{2+} , Mg^{2+} and H^+ (volumetric method) and Na^+ and K^+ (spectroscope of atomic emissions). The objectives of this work were to find prediction models such as Na exchange percentage (PSI) vs. RAS, pH vs. RAS and pH vs. adsorbed Na; to analyze if there is a limit value for adsorbed Na; to determine the evolution of organic matter, and to compare PSI using the obtained prediction. No Na adsorption limit value was found, but a carbon loss was encountered in relation to initial values. The following prediction models were determined: PSI vs. RAS: quadratic for A_p ($p \leq 0.0261$; $r^2_{aj} = 0.839$) and linear for A_1 ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0.828$); pH vs. Na: quadratic ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0.991$) for A_p and A_1 ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0.995$), and pH vs. RAS: also quadratic for A_p ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0.979$) and A_1 ($p \leq 0.0011$; $r^2_{aj} = 0.911$). PSI errors were lower with the prediction equations than with Richards' equation. The models found allow diagnosis of the sodicity and pH that the studied Argiudolls acquire when subjected to the irrigation water with different levels of RAS.

Key words: soil, sodium adsorption, statistical models.

RESUMEN

Considerando que el agua subterránea usada para riego suplementario tiene características químicas variables que pueden afectar las propiedades del suelo, se trataron un Argiudol típico (A_1) y un Argiudol ácuico (A_p), con aguas de riego artificiales de diferentes relaciones de adsorción de sodio (RAS): 6,3; 11,0; 16,5; 21,5 y 24,3. Se analizó: carbono (Walckey Black); pH (1:2,5) (a pHmetro); capacidad de intercambio catiónico (CIC), Ca^{2+} , Mg^{2+} y H^+ (volumetría) y Na^+ y K^+ (espectroscopía de emisión atómica). Los objetivos del trabajo fueron: encontrar modelos de predicción de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) vs. RAS, pH vs. RAS y pH vs. Na adsorbido; analizar si existe un valor límite de Na adsorbido; determinar la evolución de la materia orgánica y comparar PSI usando las ecuaciones predictivas obtenidas. No se encontró un valor límite de adsorción de Na^+ y sí pérdida de carbono con relación al valor inicial. Se determinaron los siguientes modelos de predicción: PSI vs. RAS: cuadrático para A_p ($p \leq 0,0261$; $r^2_{aj} = 0,839$) y lineal para A_1 ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0,828$), cuadráticos para pH vs. Na ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0,991$) para A_p y para A_1 ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0,995$) y también cuadráticos para pH vs. RAS ($p < 10^{-4}$; $r^2_{aj} = 0,979$) para A_p y para A_1 ($p \leq 0,0011$; $r^2_{aj} = 0,911$). Usando las ecuaciones de predicción se obtuvieron errores de PSI menores que con la ecuación de Richards. Los modelos encontrados permiten diagnosticar el grado de sodificación y el pH que adquieren los argiudoles estudiados sometidos a aguas de riego de diferentes RAS.

Palabras clave: suelo, adsorción de sodio, modelos estadísticos.

¹ Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química, Santiago del Estero 2829, (3000) Santa Fé, Argentina. E-mail: eschenq@fiqus.unl.edu.ar *Autor para correspondencia.

² Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas, Paraje El Pozo, (3000) Santa Fé, Argentina.

Recibido: 21 de noviembre de 2003. Aceptado: 3 de mayo de 2004.

INTRODUCCIÓN

El concepto de calidad de agua de riego se refiere a las características del agua que puedan afectar a los recursos suelo y cultivo después de su uso a largo plazo. Los problemas más comunes según los cuales se evalúan los efectos de la calidad del agua son los relacionados con la infiltración. Los factores que afectan a la infiltración son: el contenido de sales y de sodio con relación al calcio y magnesio. Una salinidad alta aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una baja la disminuye, como resultado de su naturaleza corrosiva. Una proporción alta de Na sobre el Ca produce descenso en la infiltración como consecuencia de su efecto dispersante sobre los agregados del suelo. Además de la calidad del agua, la infiltración está determinada por las características físicas y químicas del suelo. En este sentido, Ayers y Westcot (1987) presentan directrices para interpretar la calidad de las aguas, siendo la relación de adsorción de sodio (RAS), uno de los procedimientos utilizados para detectar los problemas de la infiltración.

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})^{1/2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Siendo Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} la concentración de dichos iones en el agua de riego expresados en meq L^{-1} . Con el valor de RAS se puede predecir el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), en equilibrio con dicha agua (Richards, 1985) y como consecuencia se podrían inferir las posibles modificaciones físicas que ese suelo sufriría.

$$\text{PSI} = 100 (-0,0126 + 0,014475 \text{ RAS}) / [1 + (-0,0126 + 0,014475 \text{ RAS})] \quad (\text{Ecuación 2})$$

En atención a que esta metodología puede dar resultados erráticos, pues no se toma en cuenta qué reacción sufre el Ca al ser agregado al suelo, Suarez

(1981) propuso el RAS “ajustado” que considera estos cambios, obteniendo la concentración de Ca^{2+} a partir de una tabla, cuyos datos de entrada son: la conductividad eléctrica (CE) y la relación bicarbonato libre / Ca^{2+} del agua de riego. Si bien todas las clasificaciones establecen valores límites particulares (CE, RAS, etc.) para interpretar la calidad de las aguas para el riego, éstas se definieron en función de condiciones particulares para EE.UU. Por ello es necesario establecer pautas y modelos para la utilización de aguas de riego que se adecuen mejor a las necesidades de la región central de la Provincia de Santa Fé, Argentina.

Los objetivos del trabajo fueron: establecer si existe un valor límite de adsorción de sodio para valores elevados de RAS, encontrar ecuaciones que permitan predecir el comportamiento de otros suelos en cuanto PSI vs. RAS, pH vs. Na adsorbido y pH vs. RAS, determinar la evolución de la materia orgánica en función del incremento de la RAS y comparar los valores de PSI encontrados con los de Richards (1985).

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelo. Se utilizaron dos series de suelos característicos del centro de la provincia de Santa Fé, Argentina. Un horizonte A_1 de un Argiudol típico serie Esperanza, que nunca fue cultivado, y un horizonte A_p de similar textura, correspondiente a un Argiudol ácuico con muchos años de agricultura continua, de la zona de secano de un lote, o potrero, con cuatro años de riego. La caracterización de los mismos se puede observar en el Cuadro 1.

Aguas de riego. Se utilizaron aguas de riego de diferentes RAS (Cuadro 2), preparadas en el laboratorio, a partir de sales solubles de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; para lograr los niveles crecientes de RAS se fue incrementando el nivel de Na^+ , dejando constantes las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Cuadro 1. Caracterización química de los suelos evaluados.

Table 1. Chemical characterization of the evaluated soils.

Suelos	pH	C (%)	CE (dS m ⁻¹) 25 °C	cmol. kg ⁻¹ de suelo						PSI %	Arcilla (%)
				CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺		
A _p	6,02	1,19	0,40	21,39	9,20	2,31	2,85	2,49	4,87	11,6	17,0
A ₁	6,32	2,81	0,75	25,68	15,1	2,18	2,41	2,52	3,48	9,81	18,6

A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico; C: carbono; CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; PSI: porcentaje de Na intercambiable.

Se siguió la metodología descrita por Curtin *et al.* (1993); en este caso se emplearon embudos especiales de 21,5 cm de profundidad y 4 cm de diámetro con vástago de 7 cm. Los tratamientos fueron seis para cada suelo (12 tratamientos en total, cada uno realizado por triplicado), correspondientes a un testigo (T) y a cinco niveles crecientes de RAS (6,3; 11,0; 16,5; 21,5 y 24,3). Se colocó algodón en el vértice de cada embudo, se depositaron 50 g de muestra de suelo previamente tamizada y se hicieron movimientos de rotación en el embudo para evitar el compactamiento del sistema. En cada embudo se vertieron sucesivamente alícuotas de 30 mL de una solución de RAS conocido, y en cada percolado resultante se midió la CE. Se agregaron alícuotas hasta que la CE del percolado igualó la inicial del agua de riego artificial a la misma temperatura. Se dejó escurrir la muestra y se secó al aire.

En todas las muestras se hizo la misma preparación para su análisis químico posterior. Dicha preparación consistió en su homogeneización, molido y tamizado por malla de 2 y 0,5 mm. Luego se determinó por triplicado en cada una: porcentaje de C (método estándar de Walckey y Black); pH (1:2,5 suelo/agua) por potenciometría (método electrométrico); capacidad de intercambio catiónico (CIC), Ca²⁺, Mg²⁺ y H⁺ (volumetría) y Na⁺ y K⁺ por espectroscopía de emisión atómica (SAMLA, 1998; López y López, 1990).

Como valores descriptivos, para cada variable medida se calculó: \bar{X} (valor medio), S (desviación estándar) y CV (%) (coeficiente de variación = 100 S/ \bar{X}). Con el fin de establecer si había diferencias entre las concentraciones medias de PSI y porcentaje de C para los diferentes niveles de RAS, controlando la variabilidad producida por el tipo de suelo, se empleó un diseño en bloques completos aleatorizados. En la comparación de las repuestas medias de PSI o porcentaje de C para cada nivel de RAS con el testigo, se empleó el Test de Dunnet

(Montgomery, 1991). Se verificó el ajuste a la distribución normal de los datos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Siegel, 1983) y se probó la homogeneidad de varianzas con la Prueba de Levene (Montgomery, 1991). Se utilizaron técnicas de regresión lineal y no lineal para encontrar modelos predictores para aquellas variables de interés. En la elección del mejor modelo se emplearon los siguientes criterios de selección: coeficiente de determinación ajustado máximo (r^2_{aj}), debido a que este estadístico contempla los grados de libertad en su cálculo por lo que no aumenta sistemáticamente cada vez que se incorpora una variable al modelo; cuadrado medio residual mínimo (s^2) y significancia del ANDEVA correspondiente a la regresión, ya que ante dos modelos con comportamiento semejante, se seleccionó el más parsimonioso, es decir, aquel con el menor número de variables o términos (Montgomery, 1991; Montgomery *et al.*, 2004). Todos los análisis estadísticos se realizaron usando el software SPSS 10.0 para Windows (1999). El nivel de significancia adoptado fue $\alpha = 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores promedios y los coeficientes de variación de los análisis de laboratorio, se presentan en el Cuadro 3, y a continuación se explica el tratamiento estadístico de los datos.

PSI para dos tipos de suelos y diferentes niveles de RAS

Se trabajó con un diseño en bloques completos aleatorizados para probar si los PSI medios para cada nivel de RAS eran iguales o diferentes controlando el efecto o variabilidad producida por el tipo de suelo. La elección de este diseño se justifica en el hecho que no sólo se midió PSI en todos los niveles del factor RAS para todos los suelos, sino que, en el momento de llevar a cabo la experiencia, hubo una restricción en la aleatorización de los tratamientos asignados en los suelos.

Cuadro 2. Caracterización química de las aguas de riego.

Table 2. Irrigation water chemical characterization.

Características químicas	Agua de riego de RAS 6,30	Agua de riego de RAS 11,0	Agua de riego de RAS 16,5	Agua de riego de RAS 21,5	Agua de riego de RAS 24,3
pH	8,30	8,60	8,70	8,80	8,90
CE (dS m ⁻¹) 25°C	0,95	1,60	2,10	2,70	3,00

RAS: relación de adsorción de Na; CE: conductividad eléctrica.

El modelo elegido para representar cada observación fue

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

donde y_{ij} (variable respuesta) = media general (μ), sometida al tratamiento i (τ_i , con $i = 1, \dots, a$) en el bloque j , (β_j , con $j = 1, \dots, b$) con un error aleatorio ε_{ij} .

Esta expresión llevada a las variables del problema analizado es:

$$PSI = \mu + RAS_i + Suelo_j + \text{error aleatorio}_{ij} \quad (i = 1, \dots, 6; j = 1, 2).$$

Luego de realizado el ANDEVA correspondiente se observó "efecto bloque" significativo al 5% (para suelo, $p = 0,039$), pudiendo concluirse que las medias de PSI para los diferentes niveles de RAS fueron diferentes ($p < 10^{-3}$). Por otra parte, si se considera el valor del r^2 ajustado = 0,919, se puede concluir que el 91,9% de la variabilidad de PSI está

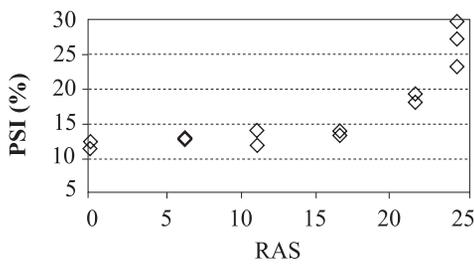
contemplada por el modelo. Se verificaron los supuestos para la aplicación de esta técnica estadística y se encontró que, si bien los errores aleatorios se distribuyen en forma normal (prueba de Kolmogorov - Smirnov, $p = 0,693$), no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas (prueba de Levene, $p = 0,018$). Como este diseño es totalmente balanceado, la no verificación de este último supuesto sólo afecta ligeramente el estadístico F del ANDEVA realizado, razón por la cual no se consideró y se prosiguió con el análisis (Montgomery, 1991).

Se puede concluir que hubo diferencia entre los niveles medios de PSI para los diferentes niveles de RAS y que la respuesta de PSI para el suelo fue mayor en los suelos A_p que para los suelos A_1 (Figura 1). Además no se observó un valor límite de adsorción de Na^+ , por lo menos en el rango de RAS del presente estudio. Se atribuye la mayor sodificación del A_p a su menor capacidad amortiguadora por poseer menor contenido de materia orgánica.

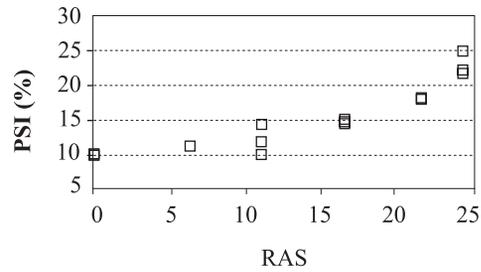
Cuadro 3. Valores promedio y coeficiente de variación (entre paréntesis) de los análisis químicos de laboratorio.
Table 3. Average values and coefficient of variations (in brackets) of laboratory chemical analysis.

Suelo	Tratamiento	Valores promedio, $cmol \cdot kg^{-1}$ (Coeficiente de variación, %)					pH	(%) C	
		CIC	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+			H^+
A_p	Testigo	21,39 (5,06)	9,20 (6,41)	2,31 (6,61)	2,85 (4,16)	2,49 (4,86)	4,87 (1,01)	6,02 (0,48)	1,19 (2,73)
	RAS 6,30	19,90 (0,15)	8,76 (1,50)	3,75 (2,78)	1,16 (6,05)	2,53 (1,42)	3,60 (3,45)	7,52 (0,38)	1,10 (3,77)
	RAS 11,0	20,95 (1,86)	10,19 (1,74)	4,40 (4,80)	1,25 (2,57)	2,64 (10,3)	2,32 (1,74)	7,98 (0,36)	1,13 (4,78)
	RAS 16,5	20,16 (0,90)	8,93 (1,63)	4,82 (2,45)	1,27 (2,08)	2,72 (1,33)	2,20 (0,26)	8,53 (0,68)	1,09 (7,42)
	RAS 21,5	19,60 (1,24)	6,96 (1,90)	4,64 (1,08)	1,26 (3,97)	3,68 (3,56)	1,96 (0,29)	8,58 (0,34)	1,02 (3,47)
	RAS 24,3	19,02 (0,98)	6,78 (2,43)	3,82 (5,67)	0,97 (5,15)	5,11 (11,3)	1,96 (0,00)	8,82 (0,86)	1,02 (2,63)
A_1	Testigo	25,68 (11,33)	15,11 (1,69)	2,18 (2,75)	2,41 (5,22)	2,52 (6,69)	3,48 (1,73)	6,32 (0,46)	2,81 (2,15)
	RAS 6,30	24,02 (1,08)	14,46 (0,97)	2,06 (3,85)	1,12 (0,89)	2,65 (1,36)	3,73 (0,31)	7,63 (0,76)	2,18 (4,53)
	RAS 11,0	23,76 (0,17)	14,38 (1,49)	2,35 (7,67)	1,19 (5,59)	2,89 (18,8)	2,85 (2,87)	7,85 (0,64)	2,16 (7,61)
	RAS 16,5	23,71 (0,70)	11,94 (1,44)	4,42 (1,93)	1,29 (0,77)	3,52 (3,06)	2,47 (6,51)	8,03 (1,44)	2,07 (3,41)
	RAS 21,5	22,20 (1,45)	11,11 (1,09)	3,14 (3,72)	1,33 (0,00)	4,08 (0,69)	1,49 (0,51)	8,15 (0,00)	2,16 (1,21)
	RAS 24,3	21,93 (1,54)	9,35 (5,47)	4,47 (13,06)	1,03 (7,55)	5,10 (4,71)	1,45 (10,5)	8,58 (0,89)	2,13 (1,97)

RAS: relación de adsorción de Na; CIC: capacidad de intercambio catiónico; A_p : Argiudol ácuico; A_1 : Argiudol típico.



Suelo A_p (Argiudol ácuico)



Suelo A₁ (Argiudol típico)

Figura 1. Valores de porcentaje de Na intercambiable (PSI) agrupados por tipo de suelo para cada valor de relación de adsorción de Na (RAS).

Figure 1. Na exchange percentage (PSI) values grouped by soil type for each sodium adsorption ratio (RAS) value.

Con el fin de predecir o de poder seleccionar estrategias de manejo del suelo en el caso de utilizar aguas con diferentes niveles de RAS, se investigó la posibilidad de establecer modelos que permitan predecir probables valores de PSI, los que se detallan en el Cuadro 4.

En el suelo A₁ el PSI respondió en forma lineal, en cambio para el A_p el mejor ajuste fue cuadrático, con todos los coeficientes estadísticamente significativos. Las ecuaciones presentadas pueden ser utilizadas para predecir PSI del suelo, sólo en el rango de RAS para las que se estudiaron.

En el Cuadro 5 se presentan los PSI obtenidos en la experiencia y los correspondientes Na intercambiable (SI) y relación de Na intercambiable (RSI) calculados (Bohn *et al.*, 1993), con el objeto de correlacionar RSI y RAS, teniendo en cuenta que la ventaja de utilizar el RSI en lugar del PSI es su independencia del valor de la CIC. Se proponen dos

nuevas ecuaciones para los dos suelos estudiados sobre la base de los datos del Cuadro 5: $RSI = a + b (RAS)$, para luego obtener los PSI correspondientes y compararlos con los PSI de Richards (Cuadro 6). Por los r^2_{aj} los incrementos en los niveles de RAS no satisfacen suficientemente bien la variabilidad de los RSI.

En el Cuadro 7 se presentan los valores de PSI calculados con la Ecuación 2 (Richards, 1985), teniendo como dato de entrada las RAS para cada tratamiento y los PSI obtenidos con las ecuaciones del experimento. Los errores se determinaron con relación a los valores de PSI medidos en el laboratorio. Se observa que los errores producidos por las ecuaciones de predicción determinadas con los datos del experimento fueron menores, en general, que los producidos con la ecuación de Richards, determinada bajo condiciones muy diferentes a las locales (Santa Fé, Argentina).

Cuadro 4. Ecuaciones de ajuste para PSI vs. RAS.

Table 4. Best fit equations for PSI vs. RAS.

Variable	Suelo A _p	Suelo A ₁
PSI =	$12,721 - 0,577 RAS + 0,044 RAS^2$ $r^2_{aj} = 0,839$ $s^2 = 2,271$ Coeficientes estimados: $p \leq 0,0261$ Error estándar de estimación de coeficientes: $\leq 1,239$ ANDEVA: $p < 10^{-4}$	$8,055 + 0,522 RAS$ $r^2_{aj} = 0,828$ $s^2 = 2,062$ Coeficientes estimados: $p < 10^{-4}$ Error estándar de estimación de coeficientes: $\leq 0,9061$ ANDEVA: $p < 10^{-4}$

PSI: porcentaje de Na intercambiable; RAS: relación de adsorción de Na; A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico; r^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado; s^2 : cuadrado medio residual.

Cuadro 5. Valores promedio de PSI, SI y RSI según la RAS del agua de riego.
Table 5. Average PSI, SI and RSI values according to RAS of the irrigation water.

Suelo	Tratamiento	Experiencia		
		PSI	SI = PSI CIC / 100	RSI = SI / (CIC - SI)
A _p	Testigo	11,64	2,49	0,132
	RAS 6,3	12,71	2,53	0,145
	RAS 11,0	12,60	2,64	0,144
	RAS 16,5	13,49	2,72	0,156
	RAS 21,5	18,78	3,68	0,231
	RAS 24,3	26,87	5,11	0,367
A ₁	Testigo	9,81	2,52	0,109
	RAS 6,3	11,03	2,65	0,123
	RAS 11,0	12,16	2,89	0,138
	RAS 16,5	14,84	3,52	0,174
	RAS 21,5	18,38	4,08	0,225
	RAS 24,3	23,26	5,10	0,303

PSI: porcentaje de Na intercambiable; A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico; SI: Na intercambiable; CIC: capacidad de intercambio catiónico; RSI: relación de Na intercambiable.

Cuadro 6. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación ajustado (r^2_{aj}) de los suelos estudiados.1

Table 6. Coefficient values and adjusted coefficient of determination (r^2_{aj}) of the studied soils.

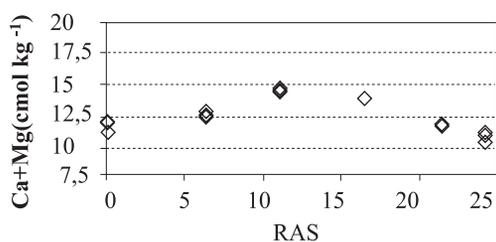
Suelo	Parámetro a	Parámetro b	r^2_{aj}
A _p	0,03722	0,01076	0,6920
A ₁	0,04441	0,00930	0,8840

A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico.

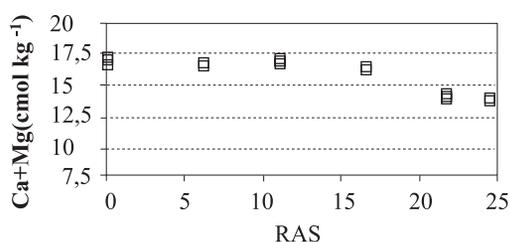
Diferencias de cationes y de CIC respecto a los valores iniciales

En el Cuadro 8 se presentan las diferencias para cada tratamiento de la CIC y de los cationes con relación a los valores del testigo de cada suelo.

Se observa que la CIC disminuye 7% en A_p y 10% en A₁, en promedio, lo que puede atribuirse a la pérdida de materia orgánica, teniendo en cuenta que la capacidad reactiva del suelo depende de los componentes del complejo coloidal de éste, principalmente arcilla y humus (Chiou *et al.*, 1990, 1992; Pennell *et al.*, 1995). El Na⁺ aumentó en promedio 33,97% en A_p para todos los tratamientos, y 44,00% en A₁. El K⁺ y el H⁺ siempre disminuyeron, el primero en promedio 59% en A_p y 50% en A₁, y el segundo en promedio 50% en A_p y 31% en A₁. El comportamiento de Ca²⁺ + Mg²⁺ fue errático, ya que en el A_p aumentó en promedio 9,64%, en cambio disminuyó 10% en promedio en A₁. Dicha variabilidad puede también observarse en la Figura 2.



Suelo A_p (Argiudol ácuico)



Suelo A₁ (Argiudol típico)

Figura 2. Valores de Ca²⁺ + Mg²⁺ (cmol₊ kg⁻¹) agrupados por tipo de suelo para cada valor de relación de adsorción de Na (RAS).

Figure 2. Ca²⁺ + Mg²⁺ (cmol₊ kg⁻¹) values grouped by soil type for each sodium adsorption ratio (RAS) value.

Cuadro 7. Valores de los PSI propuestos por el experimento y PSI predichos con las ecuaciones de Richards, con el error correspondiente.

Table 7. PSI values proposed by the experiment and Richards' equations, with the corresponding error.

Suelo	RAS	Experimento		Richards	
		PSI = RSI 100/(1 + RSI)	Error (%)	PSI	Error (%)
A _p	6,3	9,502	-3,208	7,29	-5,42
	11,0	13,465	0,865	12,79	0,19
	16,5	17,682	4,192	18,45	4,96
	21,5	21,173	2,393	22,99	4,21
	24,3	23,000	-3,870	25,32	-1,55
A ₁	6,3	9,338	-1,692	7,29	-3,74
	11,0	12,801	0,641	12,79	0,63
	16,5	16,527	1,687	18,45	3,61
	21,5	19,646	1,266	22,99	4,61
	24,3	21,297	-1,963	25,32	2,06

PSI: porcentaje de Na intercambiable; RAS: relación de adsorción de Na; RSI: relación de Na intercambiable; A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico.

Cuadro 8. Diferencias de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y de los cationes con relación a los valores iniciales.

Table 8. Differences in cation exchange capacity (CIC) and cations with regard to initial values.

Suelo	Tratamiento	CIC cmol _c kg ⁻¹	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺
A _p	RAS 6,3-testigo	-1,49	1,01	0,04	-1,69	-1,27
	RAS 11,0- testigo	-0,44	3,09	0,15	-1,60	-2,55
	RAS 16,5- testigo	-1,23	2,25	0,23	-1,58	-2,67
	RAS 21,5- testigo	-1,79	0,10	1,19	-1,59	-2,91
	RAS 24,3- testigo	-2,31	-0,90	2,62	-1,90	-2,91
A ₁	RAS 6,3- testigo	-1,66	-0,77	0,13	-1,29	0,25
	RAS 11,0- testigo	-1,92	-0,56	0,37	-1,22	-0,63
	RAS 16,5- testigo	-1,97	-0,93	1,00	-1,12	-1,01
	RAS 21,5- testigo	-3,48	-3,04	1,56	-1,08	-1,99
	RAS 24,3- testigo	-3,75	-3,47	2,58	-1,38	-2,03

CIC: capacidad de intercambio catiónico; RAS: relación de adsorción de Na; A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico.

Balance de carbono

De la observación del Cuadro 3 y de la Figura 3 se desprende que en el suelo A₁ el porcentaje de C fue mayor que en el A_p, siendo más marcada la respuesta a la RAS en el primer suelo, evidenciando una fuerte variabilidad y disminuyendo abruptamente el porcentaje de C respecto al testigo.

Al investigar cómo influye la RAS en la respuesta media del porcentaje de C en los suelos estudiados, se propuso un diseño en bloques completos aleatorizados, pues, como ya se observó, el suelo constituye una importante fuente de variación y es una restricción en la aleatorización en la asignación de

los niveles de RAS. Antes de realizar el ANDEVA correspondiente, se inspeccionó gráficamente la interacción entre los tipos de suelos y los niveles de RAS y se encontró que ésta era altamente significativa. Como el modelo elegido no es adecuado cuando esto ocurre, se estudiaron por separado los efectos de la RAS para cada suelo, pues luego del análisis gráfico y de la inspección de los resultados obtenidos, se evidenció que los suelos estudiados responden de manera diferente a la RAS en cuanto a la pérdida del C (Pc). A pesar de ello, se realizó una prueba estadística para comparar la respuesta del porcentaje de C para cada suelo, y se encontró que la media para el suelo A₁ fue significativamente superior a la media para el suelo A_p (prueba t, $p < 10^{-3}$).

Sin embargo, a niveles crecientes de RAS, hubo una Pc con relación al valor inicial para los dos suelos, datos coincidentes con Marano (2002) (Cuadro 9).

Al considerar el promedio de la Pc para cada suelo, se encontró que para el A_p fue de 9,92% y para el A₁ fue de 23,84%; dicha Pc podría ser la responsable de la disminución de la capacidad reactiva del suelo, que se evidenció en A_p, no así en A₁, que debiera reflejar una disminución de la CIC mucho mayor. Lamentablemente, con los ensayos realizados no fue posible determinar la contribución

particular de cada fracción del complejo coloidal del suelo a la CIC.

La Pc provocaría una disminución de la reactividad del suelo en el tiempo, lo cual afectaría la capacidad buffer, la adecuada adsorción de nutrientes y la retención de agua del mismo.

Con el fin de predecir estrategias de manejo de suelo, se encontraron modelos donde, por los r^2_{aj} , los incrementos en los niveles de RAS no satisfacen suficientemente bien la variabilidad del C. Para el suelo A_p el mejor ajuste fue el lineal y en el caso del suelo A₁ el cuadrático (Cuadro 10).

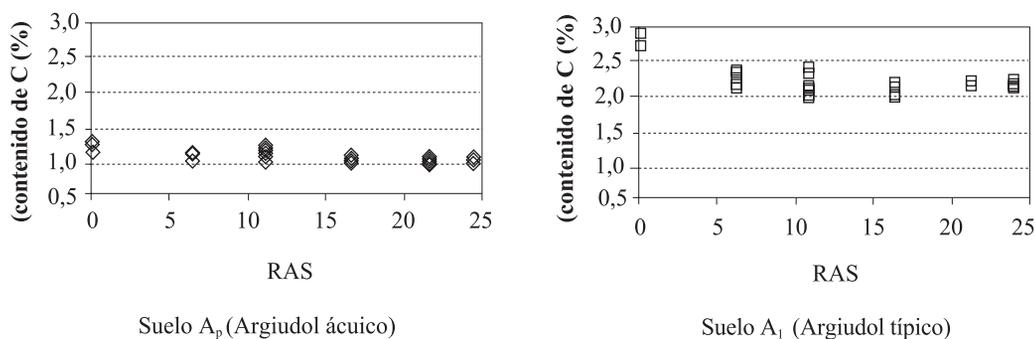


Figura 3. Porcentaje de C agrupados por tipo de suelo y para cada valor de relación de adsorción de Na (RAS).

Figure 3. Carbon percentage grouped by soil type and for each sodium adsorption ratio (RAS) value.

Cuadro 9. Porcentaje de pérdida de carbono (Pc) para los suelos A_p y A₁ con diferentes niveles de RAS.

Table 9. Carbon loss percentage (Pc) for A_p and A₁ soils with different RAS levels.

Suelos	A _p					A ₁				
RAS	6,3	11	16,5	21,5	24,3	6,3	11	16,5	21,5	24,3
Pc	-0,09	-0,06	-0,10	-0,17	-0,17	-0,63	-0,65	-0,74	-0,65	-0,68

RAS: Relación de adsorción de Na; A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico.

Cuadro 10. Ecuaciones de ajuste del porcentaje de C vs. RAS para los suelos A_p y A₁.

Table 10. Best fit equations for C percentage vs. RAS for A_p and A₁ soils.

Variable	Suelo A _p	Suelo A ₁
%C =	1,173 - 0,006 RAS $r^2_{aj} = 0,471$ $s^2 = 0,052$	2,708 - 0,081 RAS + 0,002 RAS ² $r^2_{aj} = 0,715$ $s^2 = 0,115$
	Coefficientes estimados: $p < 10^{-4}$ Error estándar de estimación de coeficientes: $\leq 0,019$ ANDEVA: $p < 10^{-4}$	Coefficientes estimados: $p < 10^{-4}$ Error estándar de estimación de coeficientes: $\leq 0,059$ ANDEVA: $p < 10^{-4}$

C: carbono; RAS: relación de adsorción de Na; A_p: Argiudol ácuico; A₁: Argiudol típico; r^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado; s^2 : cuadrado medio residual.

Adsorción de sodio

El Na forma una parte importante de la salinidad y permanece todo el tiempo soluble y en equilibrio con el Na intercambiable del suelo. La solubilidad o precipitación del Na no es afectada por factores externos. El Ca, por el contrario, no se mantiene completamente soluble sino que cambia continuamente. Estos cambios ocurren debido a la disolución de minerales como el yeso, aumentando el contenido de Ca en la solución del suelo, o a su precipitación generalmente en forma de carbonato de Ca.

En el equilibrio:

CaCO_3 (sólido) + CO_2 (disuelto) + H_2O (líquida) \leftrightarrow 2HCO_3^- (acuoso) + Ca^{2+} (acuoso), se observa que, a temperatura ambiente, la disolución del carbonato de Ca es fomentada por dilución y por el CO_2 disuelto en el agua del suelo, mientras que su precipitación depende de la presencia de suficiente Ca^{2+} , junto con carbonatos, bicarbonatos o sulfatos, en cantidades suficientes como para exceder la solubilidad del carbonato de Ca o del sulfato de Ca.

Una menor proporción de calcio disuelto en la solución del suelo permitiría una mayor adsorción de Na en el complejo arcillo húmico frente al agregado de aguas de riego con altos niveles de RAS, lo cual provocaría el aumento del espesor de la doble

capa difusa, con el consecuente efecto de peptización y aumento de pH del suelo (Wienhold y Trooien, 1998; Andriulo *et al.*, 1998). Se estudió el comportamiento del pH de los suelos (A_p y A_1) frente al incremento de niveles de RAS y de Na adsorbido. En el Cuadro 11 se presentan, las ecuaciones de mejor ajuste (cuadráticas) para cada suelo, donde el aumento de pH se explica en un 99,1% (A_p) y en un 99,5% (A_1) a partir del incremento de Na y el aumento de pH se explica en un 97,9% (A_p) y en un 91,1% (A_1) a partir del incremento de la RAS.

CONCLUSIONES

No se encontró un valor límite de adsorción de Na⁺ al menos en el rango de RAS del presente estudio, ya que siempre al aumentar el nivel de RAS aumenta el PSI. Además se observó que para casi todos los niveles de RAS ambos suelos se comportaron distinto, sodificándose más el A_p , pudiéndose atribuir ésto a la menor capacidad amortiguadora debido a su menor contenido de materia orgánica. Además con niveles crecientes de RAS hubo disminución de C (Pc) en relación al valor inicial, que puede atribuirse al escurrimiento de material coloidal orgánico que se va eluviando al aumentar la peptización del suelo. La Pc se ve reflejada en la disminución de la CIC, teniendo en cuenta que la capacidad reactiva del suelo depende de los componentes del complejo coloidal del mismo, principalmente arcilla y humus.

Cuadro 11. Valores medios de pH vs. Na y de pH vs. RAS.

Table 11. Average values of pH vs. Na and pH vs. RAS.

Variable	Suelo A_p	Suelo A_1
pH =	$3,982 \text{ Na} - 0,437 \text{ Na}^2$	$3,833 \text{ Na} - 0,428 \text{ Na}^2$
	$r^2_{aj} = 0,991$	$r^2_{aj} = 0,995$
	$s^2 = 0,737$	$s^2 = 0,536$
	Coefficientes estimados: $p < 10^{-4}$	Coefficientes estimados: $p < 10^{-4}$
	Error estándar de estimación de coeficientes: $\leq 0,175$	Error estándar de estimación de coeficientes: $\leq 0,148$
	ANDEVA: $p < 10^{-4}$	ANDEVA: $p < 10^{-4}$
	$6,001 + 0,227 \text{ RAS} - 0,005 \text{ RAS}^2$	$6,457 + 0,164 \text{ RAS} - 0,004 \text{ RAS}^2$
	$r^2_{aj} = 0,979$	$r^2_{aj} = 0,911$
	$s^2 = 0,327$	$s^2 = 0,218$
	Coefficientes estimados: $p < 10^{-4}$	Coefficientes estimados: $p \leq 0,0011$
Error estándar de estimación de coeficientes: $p \leq 0,015$	Error estándar de estimación de coeficientes: $p \leq 0,119$	
ANDEVA: $p < 10^{-4}$	ANDEVA: $p < 10^{-4}$	

RAS: relación de adsorción de Na; A_p : Argiudol ácuico; A_1 : Argiudol típico; r^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado; s^2 : cuadrado medio residual.

Se encontraron modelos para predecir el PSI vs. RAS de los suelos; cuadrático para A_p y lineal para A_1 .

Los errores de los PSI se determinaron con relación a los valores de PSI medidos en laboratorio, siendo, en general, menores los errores producidos por las ecuaciones de predicción, que los que se producen con la ecuación de Richards, determinada bajo condiciones muy diferentes a las locales.

Con relación a la evolución de los cationes: Na^+ aumentó para todos los tratamientos de ambos suelos y K^+ y H^+ siempre disminuyeron. El comportamiento de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ fue errático, ya que en el A_p aumentó y disminuyó en el A_1 .

Para ambos suelos, se encontraron modelos cuadráticos que explican adecuadamente el aumento de pH a partir del incremento de Na y el aumento de pH a partir del incremento de la RAS.

Los modelos encontrados permiten diagnosticar el grado de sodificación y el pH que adquieren los argiudoles de la región con el uso de aguas de riego de diferentes RAS.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con un subsidio CAI+D 1996 UNL.

Se agradece a la Sra. Ana Laura Pareja, la colaboración en tareas de laboratorio, búsqueda y recopilación de material bibliográfico.

LITERATURA CITADA

- Andriulo, A., M.L. Galetto, C. Ferreyra, C. Cordone, C. Sasal, F. Abrego, J. Galina, y F. Rimatori. 1998. Efecto de once años de riego complementario sobre un Argiudol Típico Pampeano. *Ciencia del Suelo* 16: 125-127.
- Ayers, R.S., y D.W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. *Riego y Drenaje* N° 29. p. 7-12. FAO, Roma, Italia.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal, y G.A. O'Connor. 1993. *Química del suelo*. 370 p. 2nd ed. Limusa, México.
- Chiou, C.T., J.F. Lee, y S.A. Boyd. 1990. The surface area of soil organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 24:1164-1167.
- Chiou, C.T., J.F. Lee, y S.A. Boyd. 1992. Reply to comment of "The surface area of soil organic matter". *Environ. Sci. Technol.* 26:404-406.
- Curtin, D., H. Seppuhn, y F. Selles. 1994. Structural stability of Chernozemic soils as affected by exchangeable sodium and electrolyte concentration. *Can. J. Soil Sci.* 74:157-164.
- López R., J., y J. López M. 1990. El diagnóstico de suelos y plantas. 363 p. 4ª ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Marano, R.P. 2002. Contribución de la fracción mineral y orgánica en la capacidad de intercambio de argiudoles del centro santafesino. p. 20. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-19 de abril de 2002. Organizado por la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Montgomery, D.C. 1991. *Diseño y análisis de experimentos*. 585 p. Grupo Editorial Iberoamericana, México.
- Montgomery, D.C., E.A. Peck, y G.G. Vining. 2004. *Introducción al análisis de regresión lineal*. 567 p. Compañía Editorial Continental, México.
- Pennell, K.D., S.A. Boyd, y L.M. Abriola. 1995. Surface area of soil organic matter reexamined. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1012-1018.
- Richards, L.A. 1985. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. 6ª ed. Manual de Agricultura N° 60. 172 p. Editorial Limusa, D.F., México.
- SAMLA. 1998. *Sistema de Apoyo Metodológico para Laboratorios de Análisis de Suelos y Aguas (SAMLA)*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Dirección de Agricultura (SAGPyA), Buenos Aires, Argentina.
- Siegel, S. 1983. *Estadística no paramétrica aplicada a ciencias de la conducta*. 275 p. Editorial Trillas, México.
- SPSS 10.0 para Windows. 1999. SPSS Inc., Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- Suarez, D.L. 1981. Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:469-475.
- Wienhold, B.J., y T.P. Trooien. 1998. Irrigation water effects on infiltration rate in the Northern Great Plains. *Soil Sci.* 163:853-858.