

RESISTENCIA Y RESILIENCIA A LA DEGRADACIÓN SALINA Y SÓDICA DE SUELOS PAMPEANOS, DISTURBADOS POR RIEGO COMPLEMENTARIO

L. GENOVA^{1, 2}

Recibido: 03/07/03

Aceptado: 15/09/03

RESUMEN

El riego complementario de cultivos extensivos en la Pampa Húmeda disturba al suelo debido al uso de aguas subterráneas ricas en HNaCO_3 . Su impacto viene estudiándose con resultados y conclusiones contradictorias, salvo que los suelos se sodifican. Génova (1992, 1993) no halló degradaciones de suelos que afectaran su productividad y propuso un modelo conceptual sobre un mecanismo de control natural de la salinidad y la sodicidad en la rizósfera. En este trabajo se determinaron la resistencia RT y la resiliencia RL de Argiudoles y Hapludoles regados con aguas de distinta calidad, asumiendo como criterio de diagnóstico la calidad del suelo, como puntos críticos las degradaciones salina y sódica y como indicadores: pH, CE_c y PSI, para calcular los modelos de Herrick y Wander (1998). No se registraron situaciones de disturbio drástico o de fragilidad del suelo que establecieran degradaciones irreversibles impidiendo recuperar capacidades de funcionamiento en tiempo razonable. En ambos suelos coinciden las tendencias en aumentar la RT y disminuir la RL a cambios de pH y de PSI con la disminución de la calidad del agua. La caracterización de la RT y RL con los modelos utilizados, disponiendo de mayor cantidad de datos espaciales y temporales, se considera útil tanto para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas, monitoreando la calidad de los suelos, como para diagnosticar degradaciones por sales y prevenirlas con el mejoramiento del sistema de manejo agronómico bajo riego.

Palabras clave. Resistencia y resiliencia del suelo, sustentabilidad de agroecosistemas bajo riego, degradación salina y sódica del suelo, mecanismos de recuperación de la calidad del suelo.

PAMPEAN SOIL RESISTANCE AND RESILIENCE TO THE SALINE AND SODIC DEGRADATION, DISTURBED BY COMPLEMENTARY IRRIGATION

SUMMARY

The complementary irrigation produce soil disturbs because the main hydric resource is sodium-bicarbonated groundwater. The background shows contradictory values and conclusions, except the increase of the adsorbed sodium in the irrigated soils. Génova (1992, 1993) doesn't find soil degradations affecting the soil productivity and had proposed a conceptual model about a salinity-sodicity natural control mechanism into the soil root zone. In this work both the resilience RL and resistance RT of Argiudols and Hapludols irrigated soils have been determined using different water quality classes, assuming as diagnosis criteria the soil quality and as the system critical points the saline and sodic degradations. Following to Masera *et al* (1999) and Seybold *et al* (1999), the pH, EC and ESP as indicators had been used to calculate the Herrick y Wander (1998) models. The tendencies of both soils were an increasing of the RT and a diminishing of the RL to pH and PSI changes with the water quality diminution. The characterization of RT and RL with the used model, with a greater amount of spatial and temporary data, is considered useful to evaluate the ecosystems sustainability controlling the soil quality and to diagnose salt degradation.

Key words. Soil resistance and resilience, irrigated ecosystems sustainability, saline and sodic soil degradation, recover mechanisms soil quality.

¹Cátedra de Riego y Drenaje, Facultad de Agronomía, UBA. Avda. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires.

²Cátedra de Hidrología Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Calles 60 y 119 (1900) La Plata.

INTRODUCCIÓN

El riego complementario es una práctica agrícola que disturba al suelo, causando impactos cuya naturaleza, ubicación, intensidad, duración y consecuencias son variables. Actualmente ocupa 120.000 ha, que representan el 14% del total de la superficie regada de la Argentina (Gorgas *et al.*, 1996), concentrado en las cuencas de la Pampa Húmeda.

Desde una perspectiva individual, el productor agropecuario de la región pampeana húmeda optimizó su actividad económica con la adopción del riego complementario, pero desde una perspectiva social y antropológica, es necesario alcanzar la sustentabilidad de los ecosistemas agroproductivos, manteniendo en el tiempo una serie de objetivos o propiedades deseadas. Este concepto dinámico deriva de un sistema de valores y debe ser analizado en determinadas condiciones sociales y ambientales, para cada ecosistema natural modificado por el hombre, como lo es el sistema de manejo de la producción de cultivos extensivos bajo riego complementario y puede definirse como un agroecosistema. Maserá *et al.* (1999) propusieron la utilización de criterios de diagnóstico para la evaluación de la sustentabilidad de sistemas de manejo agrícolas, que sirvan de vínculo entre los atributos genéricos, los puntos críticos y los indicadores, con la finalidad de dar a estos últimos, la posibilidad de evaluar efectiva y coherentemente la sustentabilidad. Un criterio de diagnóstico integral es la calidad del suelo, con el enfoque de Parr *et al.* (1992), citado por el Programa de Agroecología de GIRA (2001), cuando manifiestan que “un suelo de calidad se define como aquél que tiene la capacidad de producir cultivos sanos y nutritivos de una forma sostenida en el largo plazo y de promover, al mismo tiempo, la salud humana y animal, sin detrimento de los recursos naturales base o el medio ambiente circundante”.

El término resiliencia del suelo fue incorporado a la ciencia edáfica recientemente, para remitir los temas de ecología de suelos al uso sustentable de tierras y se introdujo para crear una teoría común que describa la reacción del suelo a rangos de impactos o disturbios. Blum (1994) sostuvo que a causa de la complejidad del suelo y de las muchas maneras que puede reaccionar a disturbios externos, la resiliencia todavía no fue definida operacionalmente y Szabolczs (1995) agregó que sería necesario, además de una precisa definición, disponer de métodos para medirla y describir los procesos resilientes. Warkentin (1996) resumió las relaciones entre sustentabilidad y

resiliencia de la siguiente manera: “la calidad del suelo es la llave de la sustentabilidad” y Doran *et al.* (1996) aportaron que “la dirección de la calidad del suelo con el tiempo es un indicador primario del manejo sustentable”. Seybold *et al.* (1999) clarificaron el concepto de resiliencia y su pertenencia al suelo, definieron sus relaciones con la calidad de suelo y revisaron la literatura sobre su medición y cuantificación. Adoptaron la definición de Herrick y Wander (1998): resiliencia del suelo es la capacidad de un suelo de recuperar su integridad funcional y estructural después de un disturbio, aunque Rozanov (1994) y Lang (1994) hayan definido la resiliencia del suelo como la capacidad de resistir cambios causados por un disturbio. Como la resistencia es un importante componente de la estabilidad de los ecosistemas, Williams y Chartres (1991) diferenciaron resistencia de resiliencia al expresar: “la magnitud de la disminución de la capacidad de un suelo de funcionar (resistencia) y la tasa de recuperación o la elasticidad (resiliencia) son dos llaves para medir la sustentabilidad”

Con respecto al riego en la región húmeda, su incorporación como práctica agronómica innovadora fue resistida durante muchos años debido a tres causas principales: desconocimiento de la tecnología del riego, uso de métodos inespecíficos para evaluar la calidad del agua para riego (Génova, 1989, 1993; Costa, 1999; Marano, 2000) y la inexactitud de los pronósticos sobre salinización y sodificación de los suelos regados. En los últimos 20 años se han reportado pronósticos y diagnósticos del impacto del riego complementario en los suelos pampeanos. Un grupo de autores enfatizaron la inconveniencia de regar con las aguas subterráneas disponibles, entre ellos Arens (1969), quien estimó que el uso de agua freática de $CE = 0,95$ dS/m y $RAS = 7$ a 8 , formaría un suelo sódico en 9 a 18 años, llegando a un estado de equilibrio final en 18 a 24 años. Lavado (1976) informó incrementos de salinidad y alcalinidad por riego complementario en suelos de La Pampa y Cerana (1980) señaló un importante aumento de la sodificación en un Hapludol regado con aguas bicarbonatadas de baja salinidad. Irurtia y Mon (1998) hallaron leves aumentos de salinidad, sodicidad y pH y deterioro de algunos parámetros físicos de un Argiudol producidos por 5 años de riego. Andriulo *et al.* (1998) encontraron un efecto acumulativo de 11 años de riego complementario con aguas bicarbonatadas sódicas sobre un Argiudol, principalmente aumentos marcados en el PSI (máximo del 12%) y el pH y más leves en

la CE. Abrego *et al.* (1998) indicaron que el aumento del PSI superficial de un Argiudol, causado por 11 años de riego con agua rica en HNaCO_3 , alteró la estabilidad de la estructura del suelo y la dinámica del agua.

Otros investigadores reportaron fuertes incrementos del PSI, moderados del pH y leves de la CE en los suelos regados, concluyendo que dichas evidencias no invalidaban la incorporación del riego bajo condiciones de manejo adecuadas. Génova (1986, 1989, 1992, 1993) estudió la evolución salina de suelos pampeanos, regados por surcos con agua de alto contenido de HNaCO_3 durante varios años consecutivos y halló una alternancia del PSI medido antes y después de cada temporada de riego, con valores medios de 4 a 5% y extremos menores de 8%. Wyckers y Génova (1987) informaron que la lluvia lixivió las sales aportadas por riego, que los valores máximos de PSI nunca superaron el 7% y que aguas sódicas poco salinas incrementaron más el PSI que aguas con mayor equilibrio CE/RAS. Grenón (1988) reportó que la salinidad generada por riego fue luego lixiviada por las lluvias y que el Na incorporado aumentó el PSI en relación directa con la concentración del agua, también en parte lixiviado, sin retrotraerlo a los valores originales, aunque el PSI nunca alcanzó los valores de equilibrio predichos por Richards *ed.* (1954). Svartz (1993), simuló riego en columnas de suelo sin disturbar, midiendo sodificaciones no coincidentes con el riesgo de sodificación pronosticado por el US Salinity Lab. (Richards *ed.* 1954) y que el aumento del Na se produjo a expensas del desplazamiento del H de cambio más que del Ca y Mg.

Más recientemente, Génova (1996) reportó valores de pH, CE_{ex} y PSI de suelos regados por aspersión similares a los regados por surcos, con una salinidad levemente superior, probablemente debido a que la mayor eficiencia de aplicación de agua de la aspersión produjo menor lixiviación de sales, aunque el exceso de precipitación volvió a controlar la posible salinización del suelo. Andriulo y Ferreyra (1997) y Andriulo *et al.* (1998) informaron menores incrementos de sales que de Na en suelos con 11 años consecutivos de riego. Peinemann *et al.* (1998) arribaron a resultados drásticos a partir de ensayos de laboratorio, pero manifestaron que en la naturaleza interactúan algunas variables que morigeran los efectos negativos de la aplicación del riego. Costa (1999) reportó que el régimen de lluvias y la capacidad de drenaje de suelos del sudeste de Buenos

Aires permitieron el riego suplementario sin riesgo de salinización y que si bien los incrementos del PSI fueron más persistentes, las lluvias otoñales e invernales parecieron prevenir el aumento de la sodificación, estabilizando los valores RAS del suelo en 5 a 6. Caviglia y Papparotti (2000) y Caviglia *et al.* (2000) trabajando sobre suelos de Entre Ríos, encontraron valores de salinización y sodificación coincidentes con los reportados por otros investigadores, resaltando que los menores aumentos del PSI se registraron en los suelos vertisoles. Marano, Pilatti y de Orellana (2000) calcularon las constantes de Gapón K_G para 3 horizontes de un Argiudol ácuico, demostrando la distinta selectividad del intercambiador y construyeron ecuaciones de regresión explicando relaciones entre la RAS del agua, el PSI y el pH del suelo regado, concluyendo que puede pronosticarse el pH y el PSI en equilibrio con la RAS del agua; que el incremento del Na intercambiado y del pH varía con el aumento de la RAS del agua y la naturaleza de los horizontes y que el Na adsorbido desplazó en primer término a la acidez de cambio y luego al K, mientras que el Ca y el Mg no presentaron una tendencia definida. Marano (2000), comprobó cuantitativamente que el agua bicarbonatada sódica produjo sodificación y aumento de pH del suelo regado durante 4 años, que las aguas ricas en Na produjeron los mayores aumentos del PSI y que existe un equilibrio entre la concentración iónica de la solución y el complejo de intercambio, suponiendo que algunos suelos presentan una capacidad de amortiguamiento frente al proceso de sodificación, hasta superar un valor umbral y que la ecuación de Gapón no permite predecir los valores del PSI que alcanzaría un suelo en equilibrio con una dada RAS del agua de riego, porque desestima el 30 % de los cationes de cambio representados por H^+ y K^+ . Por último, afirmó que el posible efecto del agua rica en HNaCO_3 debería reflejarse en las propiedades físicas del suelo y la respuesta de los cultivos y que los 4 años sucesivos de riego no aumentaron el deterioro de la macroporosidad, la infiltración y la estabilidad estructural, lo cual demostraría la acción de mecanismos tipo tampón que mantienen la productividad del suelo. Sasal *et al.* (2000), debido a la sodificación encontrada en un suelo regado durante 5 a 9 años, propusieron aplicar enmiendas cálcicas para viabilizar las técnicas de riego en la Pampa Húmeda.

Génova (1992, 1993) formuló un modelo conceptual sobre la existencia de un mecanismo natural de

control de la salinización y sodificación, operado por la interrelación de varios factores y procesos, como el régimen de lluvias, el lavado de sales, la abundancia de Ca intercambiable, el intercambio catiónico favorecido por la mayor actividad del Ca^{++} en soluciones diluídas, la drenabilidad de los suelos, la alternancia de situaciones de concentración y dilución de la solución del suelo, la falta de influencia del acuífero freático, sin vincular estos conceptos con la sustentabilidad, resiliencia, resistencia y mecanismos de recuperación de la capacidad de funcionamiento edáfico.

Frente a la trascendencia del riego complementario, con efectos positivos en la economía productiva, pero también constituyendo un disturbio que altera el funcionamiento de los agroecosistemas, los objetivos de este trabajo fueron medir la resistencia y la resiliencia a la degradación salina y sódica de suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos, regados con aguas de diferente salinidad y sodicidad, con el propósito de evaluar el posible mantenimiento de la calidad edáfica, que permitiría expresar grados de sostenibilidad del sistema de manejo agronómico bajo riego complementario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Siguiendo a Masera *et al.* (1999) y a Seybold (1998, 1999), se seleccionó la calidad del suelo como criterio de diagnóstico para evaluar la sustentabilidad del sistema de producción de cultivos regados, pues el impacto negativo más importante del riego ocurre en el suelo, que puede cambiar su calidad por alteración de su funcionamiento y consecuentemente su productividad.

Se estudió la incidencia de tres clases de agua de riego (C3S3, C3S2 y C2S2 según el US Salinity Laboratory (Richards, 1956), en seis Argiudoles típicos, correspondientes a las series Hughes, Venado Tuerto, Arroyo Dulce, Gouin y Ramallo (INTA, 1989) y dos Hapludoles típicos, series Junín (INTA, 1989) y Loma profunda (Tecnoagro, 1993), todos de la Región Pampeana, analizando comparativamente los valores de RT y RL a la degradación salina y sódica. El riego complementario durante distintos períodos (3, 4, 6 y 12 años) se consideró el disturbio que afecta la calidad del suelo y los puntos críticos elegidos fueron la degradación salina y sódica de los suelos. Los indicadores utilizados han sido, para los suelos: pH, CE_{ex} (conductividad eléctrica del extracto de saturación, en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y el PSI (% de Na intercambiable) y para las aguas subterráneas: pH, CEa (conductividad eléctrica, en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y la RAS (relación de adsorción de Na, en $(\text{me}/\text{l}) / (\text{me}/\text{l})^{-1/2}$).

En los Cuadros N° 1 a 3 se sintetiza la información generada por Génova (1988, 1993, 1996), donde los va-

lores de los indicadores referentes al suelo, son promedio de cuatro repeticiones, con diferencias significativas al 5%, de muestras de los horizontes superficial y subsuperficial de lotes agrícolas regados por surcos y aspersión, de 35 a 50 ha. El Cuadro N° 4 muestra los valores de los indicadores referentes al agua de riego, promedios de tres muestras extraídas en boca de pozo en funcionamiento, al promediar la temporada de riego.

La resiliencia RL y la resistencia RT del suelo a la degradación salina y sódica se evaluaron utilizando los modelos de Herrick y Wander (1998): $\text{RL} = (\text{B}-\text{C}) / (\text{A}-\text{C})$, $\text{RT} = \text{C}/\text{A}$ y Tasa de resiliencia $\text{TRL} = \text{dRL} / \text{dt}$, donde A es la capacidad de funcionamiento del suelo antes de sufrir el disturbio, B el nivel de recuperación a un nivel de equilibrio estabilizado de funcionamiento del suelo, C el nivel de la función del suelo inmediatamente después de ocurrido el disturbio, dRL y dt los diferenciales de RL y tiempo. Se consideró representativo de los valores A al nivel del indicador en condiciones iniciales (secano), en ausencia del disturbio. Los valores B se calcularon promediando los datos obtenidos durante el período de medición antes de cada temporada de riego, asumiendo que representan la situación de equilibrio entre el agua aportada por riego y la incidencia de los factores y procesos recuperativos. Los valores C se calcularon promediando las mediciones de los indicadores inmediatamente después de ocurrido el disturbio, al finalizar la temporada de riego.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de los indicadores de salinidad y sodicidad de los suelos regados con aguas de distinta calidad (Cuadros N° 1, 2 y 3), no han alcanzado magnitudes que puedan vincularse con degradaciones irreversibles de la calidad del suelo, aunque claramente se observan incrementos del sodio absorbido y del pH respecto de la condición inicial (secano), coincidiendo con los antecedentes regionales, mientras que se registran aumentos y descensos de la salinidad. Las diferencias entre valores medios de CE_{ex} y de PSI resultaron estadísticamente significativos ($p < 0,05$), no así las referidas al pH.

La cantidad de datos disponibles relativos tanto a sitios muestrales como a número de años de riego, se consideran insuficientes para abordar el tamaño del área estudiada y la variabilidad intrínseca de la salinidad y la sodicidad, por lo que no se pretende arribar a conclusiones definitivas sobre la sustentabilidad de los agroecosistemas.

En el Cuadro N° 5 se presentan los valores medios de RT, RL y TRL de los Argiudoles y Hapludoles

CUADRO N° 1. Valores de pH del suelo.

Lugar	Calidad del agua	Serie de suelo	Horizonte	Inicial	Durante el período de medición					
					1	2	3	4	5	6
					a	b	a	b	a	b
Ea. Santa Emilia	C3S3	Hughes	c	6,00	6,60	6,80	6,40	6,80	s/d	s/d
Elortondo (Sta. Fe)	C3S3	(Argiudol)	d	6,10	6,60	6,80	6,50	6,90	s/d	s/d
Ea. Lamili	C3S3	V. Tuerto	c	5,80	5,90	6,00	6,10	6,20	s/d	s/d
Carmen (Sta. Fe)	C3S3	(Argiudol)	d	5,90	5,90	6,10	6,20	6,20	s/d	s/d
Ea. Santa Elena	C3S2	A. Dulce	c	5,40	5,90	5,90	5,80	6,00	s/d	s/d
Rojas (Bs. As.)	C3S2	(Argiudol)	d	5,60	5,80	5,90	5,70	5,90	s/d	s/d
Ea. La Guardia	C3S2	Gouin	c	5,60	5,73	5,89	5,71	5,97	5,80	6,10
C. de Areco (Bs. As.)	C3S2	(Argiudol)	d	5,80	5,80	6,11	6,12	5,87	5,78	6,00
Ea. Santa Ida	C3S2	Loma prof.	c	6,70	6,80	6,70	6,80	6,60	6,80	7,10
Huanguelén (Bs. As.)	C3S2	(Hapludol)	d	7,00	7,10	7,20	6,80	6,90	6,90	6,80
Ea. La Federala	C2S2	Gouin	c	5,60	5,65	5,78	5,74	5,98	s/d	s/d
C. de Areco (Bs. As.)	C2S2	(Argiudol)	d	5,80	5,55	5,83	5,80	6,10	s/d	s/d
Ea. El Rincón	C2S2	Ramallo	c	5,50	5,50	5,70	5,60	5,80	5,60	5,80
San Pedro (Bs. As.)	C2S2	(Argiudol)	d	5,90	6,00	6,10	6,10	6,00	5,90	6,10
Ea. La Argentina	C2S2	Junín	c	6,30	6,20	6,50	6,30	6,50	6,20	6,60
Junín (Bs. As.)	C2S2	(Hapludol)	d	7,30	7,40	7,50	7,70	7,90	7,50	7,70

Referencias (a) Muestreo de suelos efectuado antes de la temporada de riego.
 (b) Muestreo de suelos inmediatamente después de la temporada de riego.
 (c) Horizonte superficial del suelo.
 (d) Horizonte subsuperficial del suelo.

a cambios de pH, CE_{ex} y PSI, con los cuales se construyeron las graficas de las Figuras 1 a 6, correlacionando el comportamiento de los suelos regados con aguas de salinidad y sodicidad crecientes, en términos de RT y RL. Las TRL no fueron comparativamente analizadas debido a que los suelos estudiados no recibieron riego durante la misma cantidad de años.

En la Figura 1 se observa que la RT a cambios del pH de los Argiudoles, aumenta muy levemente a medida que el agua de riego fue más salina y sódica, mientras que la RL disminuyó casi un 100% entre el agua de mayor calidad C2S2 respecto de la que le sigue en salinidad C3S2 y disminuyó un 232% respecto de la más sódica C3S3, siempre con valores positivos de RL. La Figura 2 muestra la misma tendencia de los Hapludoles, pero la RL toma valores negativos.

La RT a modificaciones de la salinidad de los Argiudoles no se correlacionó con el incremento de la CE_a (Figura 3), posiblemente debido a la gran incidencia del lavado por lluvias y por las fracciones

de lixiviación derivadas de la ineficiencia de aplicación de los métodos de riego, cuyo análisis cuantitativo no se efectuó en este trabajo. La RL a cambios salinos disminuyó con el aumento de la salinidad del agua de riego, alcanzando incluso valores negativos, dado que frecuentemente la CE_{ex} después del período de riego fue inferior a la inicial de secano. En cambio los Hapludoles, si bien aumentaron su RT con el incremento del contenido salino del agua (Figura 4), aún siendo escasa la diferencia entre ellas, del orden de 0,3 dS/m, también aumentaron su RL con la salinidad creciente del agua, inversamente a lo ocurrido con la RL a cambios de pH y PSI de los dos tipos de suelo.

En las Figuras 5 y 6 se ilustran las variaciones de la sodicidad, donde ambos suelos muestran una tendencia similar al aumento de la RAS del agua de riego: crece la RT y decrece la RL. En los Hapludoles, las variaciones de la RT y la RL son más pronunciadas que en los Argiudoles, asumiéndose que el mayor impacto del sodio aplicado ocurre en

CUADRO Nº 2. Valores de salinidad del suelo (CE_{e_s} , dS/m).

Lugar	Calidad del agua	Serie de suelo	Horizonte	Inicial	Durante el período de medición					
					1	2	3	4	5	6
					a	b	a	b	a	b
Ea. Santa Emilia	C3S3	Hughes	c	0,25	0,62	0,52	0,55	0,51	s/d	s/d
Elortondo (Sta. Fe)	C3S3	(Argiudol)	d	0,23	0,58	0,35	0,49	0,33	s/d	s/d
Ea. Lamili	C3S3	V. Tuerto	c	0,27	0,61	0,62	0,58	0,63	s/d	s/d
Carmen (Sta. Fe)	C3S3	(Argiudol)	d	0,24	0,59	0,51	0,55	0,58	s/d	s/d
Ea. Santa Elena	C3S2	A. Dulce	c	0,26	0,68	0,43	0,55	0,51	s/d	s/d
Rojas (Bs. As.)	C3S2	(Argiudol)	d	0,24	0,62	0,52	0,54	0,53	s/d	s/d
Ea. La Guardia	C3S2	Gouin	c	0,25	0,25	0,58	0,54	0,36	0,40	0,36
C. de Areco (Bs. As.)	C3S2	(Argiudol)	d	0,22	0,29	0,22	0,26	0,22	0,36	0,35
Ea. Santa Ida	C3S2	Loma prof.	c	0,20	0,28	0,60	0,41	0,40	0,37	0,43
Huanguelén (Bs. As.)	C3S2	(Hapludol)	d	0,20	0,29	0,51	0,33	0,39	0,35	0,39
Ea. La Federala	C2S2	Gouin	c	0,23	0,50	0,39	0,45	0,41	s/d	s/d
C. de Areco (Bs. As.)	C2S2	(Argiudol)	d	0,22	0,47	0,32	0,42	0,33	s/d	s/d
Ea. El Rincón	C2S2	Ramallo	c	0,19	0,22	1,19	0,50	0,25	0,36	0,39
San Pedro (Bs. As.)	C2S2	(Argiudol)	d	0,20	0,11	0,26	0,40	0,20	0,28	0,70
Ea. La Argentina	C2S2	Junín	c	0,30	0,88	0,67	0,50	0,26	0,69	0,55
Junín (Bs. As.)	C2S2	(Hapludol)	d	0,32	0,63	0,25	0,29	0,60	0,56	0,41

los suelos con menor capacidad de intercambio catiónico CIC, como también el menor grado de recuperación, expresado por la disminución de la RL con aguas más sódicas. Los Argiudoles muestran su elevado poder buffer debido al mayor contenido en arcillas más complejas y en MO, que en conjunto determinan altas CIC, produciendo valores más bajos de RT (menor sodificación por riego) y también más bajos de RL (estabilización en niveles más altos de sodicidad que significan una menor capacidad de recuperación).

Por último, en el Cuadro Nº 6 se resumen las tendencias encontradas en los suelos referentes a la RT y RL frente a valores crecientes de CE y RAS de las aguas subterráneas.

CONCLUSIONES

La cuantificación de la resistencia y resiliencia a la degradación salina y sódica efectuada con los indicadores seleccionados, parece resumir adecua-

damente el comportamiento de suelos estudiados y permite realizar comparaciones entre los distintos suelos regados con aguas de diferente calidad.

Coinciden las tendencias de Argiudoles y Hapludoles en aumentar su RT y disminuir su RL a cambios de pH y de PSI con la disminución de la calidad del agua. Respecto a la variación de la salinidad de los suelos con el incremento del tenor salino del agua, no se encontró correlación en la RT de los Argiudoles, aunque la RL también disminuyó, mientras que los Hapludoles aumentaron su RT y RL.

Las magnitudes de la RT indicaron que durante la ocurrencia del disturbio, continuaron sin grandes cambios las funciones edáficas y que los valores de RL evidenciaron la elasticidad o grado de recuperación de los suelos, manteniendo su calidad después de sufrido el disturbio. Por lo tanto, la caracterización de la RT y RL, disponiendo de mayor cantidad de datos espaciales y temporales, se considera útil para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas o cuencas hidrográficas, monitoreando la calidad de los suelos, para diagnosticar degradaciones por sales y

CUADRO N° 3. Valores de sodicidad del suelo (PSI).

Lugar	Calidad del agua	Serie de suelo	Horizonte	Inicial	Durante el período de medición					
					1	2	3	4	5	6
					a	b	a	b	a	b
Ea. Santa Emilia	C3S3	Hughes	c	1,47	1,90	5,45	2,10	5,70	s/d	s/d
Elortondo (Sta. Fe)	C3S3	(Argiudol)	d	1,34	1,70	1,98	1,75	1,86	s/d	s/d
Ea. Lamili	C3S3	V. Tuerto	c	1,29	1,35	2,43	1,92	3,67	s/d	s/d
Carmen (Sta. Fe)	C3S3	(Argiudol)	d	1,32	1,40	1,43	1,96	3,98	s/d	s/d
Ea. Santa Elena	C3S2	A. Dulce	c	1,99	1,60	3,80	2,93	4,10	s/d	s/d
Rojas (Bs. As.)	C3S2	(Argiudol)	d	2,50	1,33	2,68	2,71	3,10	s/d	s/d
Ea. La Guardia	C3S2	Gouin	c	1,31	1,39	3,72	2,00	4,70	2,32	3,10
C. de Areco (Bs. As.)	C3S2	(Argiudol)	d	1,73	1,62	2,72	2,20	3,85	2,48	3,10
Ea. Santa Ida	C3S2	Loma prof.	c	1,15	1,75	5,62	2,19	3,80	1,87	4,10
Huanguelén (Bs. As.)	C3S2	(Hapludol)	d	1,09	1,57	4,91	3,30	4,00	2,14	4,35
Ea. La Federala	C2S2	Gouin	c	1,36	1,55	4,13	1,65	4,40	s/d	s/d
C. de Areco (Bs. As.)	C2S2	(Argiudol)	d	1,65	1,55	3,25	1,59	3,40	s/d	s/d
Ea. El Rincón	C2S2	Ramallo	c	1,62	2,40	2,77	2,50	4,17	2,38	0,88
San Pedro (Bs. As.)	C2S2	(Argiudol)	d	2,27	2,50	2,29	2,30	3,10	2,22	1,35
Ea. La Argentina	C2S2	Junín	c	3,90	3,33	7,59	6,05	4,25	4,26	6,34
Junín (Bs. As.)	C2S2	(Hapludol)	d	2,71	1,61	2,36	2,90	3,10	2,30	3,36

- Referencias (a) Muestreo efectuado antes de la temporada de riego.
 (b) Muestreo inmediatamente después de la temporada de riego
 (c) Horizonte superficial del suelo.
 (d) Horizonte subsuperficial del suelo.

CUADRO N° 4. Salinidad y sodicidad de las aguas de riego.

Clase	Procedencia	CE _a (dS/m)	RAS
C3S3	Ea. Santa Emilia, Elortondo, Santa Fé.	1,00	18,50
C3S3	Ea. Lamili, Cármen, Santa Fé.	1,60	23,10
C3S2	Ea. Santa Elena, Rojas, Bs. Aires.	1,00	12,90
C3S2	Ea. La Guardia, C. de Areco, Bs. Aires.	1,00	8,90
C3S2	Ea. Santa Ida, Huanguelén, Bs. Aires.	1,17	9,90
C2S2	Ea. La Federala, C. de Areco, Bs. Aires.	0,69	7,00
C2S2	Ea. El Rincón, San Pedro, Bs. Aires.	0,75	7,20
C2S2	Ea. La Argentina, Morse, Junín, Bs. Aires.	0,68	10,20

CUADRO N° 5. Resistencia y resiliencia de suelos a la degradación salina.

Lugar	Calidad del agua	A	B	C	Resistencia	Resiliencia	Tiempo	Tasa de resiliencia
					RT	RL	(años)	TRL
4.1. Referidas al pH.								
Ea. Santa Emilia	C3S3	6,050	6,525	6,825	1,128	0,387	6	0,065
Ea. Lamili	C3S3	5,850	6,025	6,125	1,045	0,364	3	0,121
Ea. Santa Elena	C3S2	5,500	5,800	5,925	1,077	0,294	3	0,098
Ea. La Guardia	C3S2	5,700	5,823	5,990	1,051	0,576	12	0,048
Ea. Santa Ida	C3S2	6,850	6,866	6,883	1,005	0,515	4	0,129
Ea. La Federala	C2S2	5,700	5,685	5,922	1,039	1,068	3	0,356
Ea. El Rincón	C2S2	5,700	5,783	5,917	1,038	0,618	4	0,154
Ea. La Argentina	C2S2	6,800	6,883	7,116	1,046	0,737	3	0,246
4.2. Referidas a la salinidad, indicada por la CE_{ex} , en dS/m.								
Ea. Santa Emilia	C3S3	0,240	0,560	0,428	1,783	-0,702	6	-0,117
Ea. Lamili	C3S3	0,255	0,583	0,585	2,294	0,006	3	0,002
Ea. Santa Elena	C3S2	0,250	0,598	0,498	1,992	-0,403	3	-0,134
Ea. La Guardia	C3S2	0,235	0,350	0,348	1,481	-0,018	12	-0,001
Ea. Santa Ida	C3S2	0,200	0,338	0,454	2,270	0,457	4	0,114
Ea. La Federala	C2S2	0,225	0,460	0,363	1,613	-0,703	3	-0,234
Ea. El Rincón	C2S2	0,195	0,312	0,499	2,559	0,615	4	0,154
Ea. La Argentina	C2S2	0,310	0,592	0,457	1,474	-0,918	3	-0,306
4.3. Referidas a la sodicidad, indicada por el porcentaje de sodio intercambiable PSI.								
Ea. Santa Emilia	C3S3	1,405	1,863	3,748	2,67	0,80	6	0,134
Ea. Lamili	C3S3	1,305	1,658	2,878	2,21	0,78	3	0,259
Ea. Santa Elena	C3S2	2,245	2,143	3,420	1,52	1,09	3	0,362
Ea. La Guardia	C3S2	1,520	2,002	3,532	2,32	0,76	12	0,063
Ea. Santa Ida	C3S2	1,120	2,137	4,464	3,99	0,70	4	0,174
Ea. La Federala	C2S2	1,505	1,585	3,795	2,52	0,97	3	0,322
Ea. El Rincón	C2S2	1,945	2,362	2,427	1,25	0,13	4	0,034
Ea. La Argentina	C2S2	3,305	3,409	4,500	1,36	0,91	3	0,304

Referencias

A = valores medios iniciales (sin riego)

B = valores medios obtenidos inmediatamente después de finalizada la temporada de riego.

C = valores medios obtenidos antes de comenzar la temporada de riego.

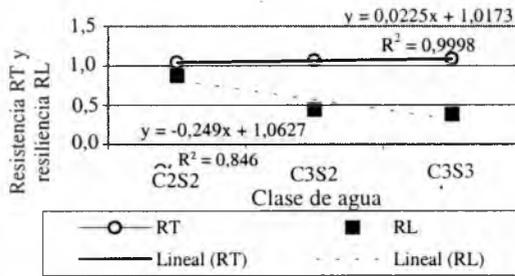


FIGURA 1. Resistencia y resiliencia de Argiudoles a cambios de pH.

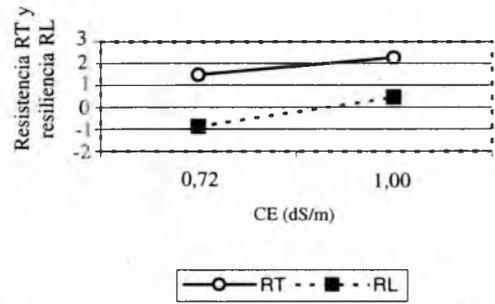


FIGURA 4. Resistencia y resiliencia de Hapludoles a cambios en la salinidad.

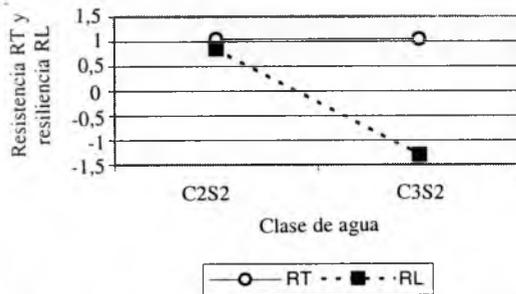


FIGURA 2. Resistencia y resiliencia de Hapludoles a cambios de pH.

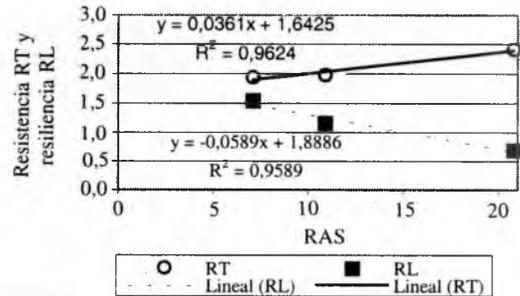


FIGURA 5. Resistencia y resiliencia de Argiudoles a cambios en la sodicidad.

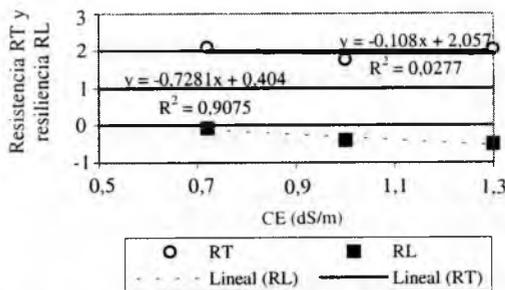


FIGURA 3. Resistencia y resiliencia de Argiudoles a cambios de la salinidad.

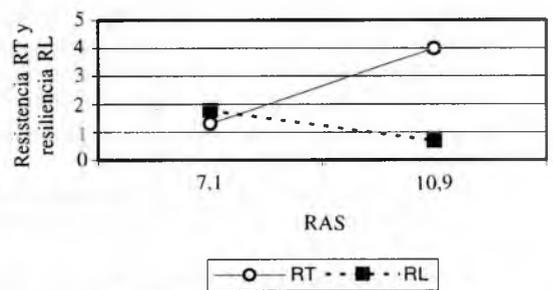


FIGURA 6. Resistencia y resiliencia de Hapludoles a cambios en la sodicidad.

CUADRO N° 6. Tendencia de la resistencia RT y la resiliencia RL de los suelos a cambios del pH, la CE_{ex} y el PSI.

SUELOS	pH		CE _{ex}		PSI	
	RT(pH)	RL(pH)	RT(CE _{ex})	RL(CE _{ex})	RT(PSI)	RL(PSI)
Argiudoles	Aumenta (1) r ² =0,99	Disminuye (1) r ² =0,85	No correlaciona r ² =0,02	Disminuye (2) r ² =0,91	Aumenta (3) r ² = 0,96	Disminuye (3) r ² =0,96
Hapludoles	Aumenta (1)	Disminuye (1)	Aumenta (2)	Aumenta (2)	Aumenta (3)	Disminuye (3)

(1) Con la CEa y la RAS del agua de riego.

(2) Con la CEa del agua de riego.

(3) Con la RAS del agua de riego.

para prevenirlas con el mejoramiento del sistema de manejo agronómico bajo riego.

Los resultados de la aplicación de los modelos utilizados, permiten asociar la respuesta resistente y resiliente del suelo a las degradaciones salina y

sódica producidas por aguas más o menos mineralizadas y sus relaciones CE/RAS, relativizando las predicciones emanadas de las clasificaciones convencionales de aptitud de aguas para riego.

BIBLIOGRAFÍA

- ABREGO, F.; A. ANDRIULO; C. FERREYRA; M. GALETTO; J. GALINA; C. IRURTIA; R. MON; F. RIMATORI y C. SASAL. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. II. Propiedades físicas. *Actas XVI Cong. Arg. Ciencia del Suelo, Comisión IV*, 249:250 pp.
- ANDRIULO, A. y C. FERREYRA. 1997. Impacto ambiental del riego complementario: rumbo a la ecoeficiencia. *Com. Rev. de Tec. Agrop. INTA Pergamino. Vol II (6):51-53.*
- ANDRIULO, A.; M. GALETTO; C. FERREYRA; G. CORDONE; C. SASAL; F. ABREGO; J. GALINA y F. RIMATORI. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. I: Propiedades físico-químicas. *Actas del XVI Cong. Arg. Ciencia del Suelo, Comisión IV*, 247:248 pp.
- ANDRIULO, A.; M. de GALETTO; C. SASAL; F. ABREGO; M. BUENO; F. RIMATORI y M. de la CRUZ. 2000. Efecto del riego complementario con aguas salino-sódicas sobre algunas propiedades del suelo en el Sudoeste Santafesino. *Actas del XVII Cong. Arg. Ciencia del Suelo, Com. IV, N° 5.*
- ARENS, P. 1969. Algunos efectos del riego suplementario sobre los suelos de la Pampa Ondulada. *Actas de la 5ta. Reunión de la A.A.C.S. Santa Fe* pp 98-102.
- AUGE, M. y M. HERNANDEZ. 1983. Características geohidrológicas de un acuífero semiconfinado (Puelche) en la Llanura Bonaerense. Su implicancia en el ciclo hidrológico de llanuras dilatadas. *Actas del Coloquio de Olavarría. Vol II. Buenos Aires-París.*
- BLUM, W. 1994. Soil resilience- General aproaches and definition. *In Proc. 15 th World Cong. of soil sci. Acapulco, México.* pp 233-237.
- CAVIGLIA, O. y O. PAPAROTTI. 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 del XVII Cong. Arg. Ciencia del Suelo, Comisión IV, N° 15.*

- CAVIGLIA, O.; P. BARBAGELATA y O. PAPAROTTI. 2000. Evaluación de dos sistemas de labranza con riego suplementario. II. Impacto del agua de riego de calidad dudosa sobre algunas propiedades químicas del suelo. Actas del XVII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Comisión IV, N° 17.
- CERANA, J. 1980. Deterioro de los suelos a consecuencia de riegos con aguas poco salinas que contienen bicarbonatos. Actas 6ta Reunión AACCS Paraná. I: 55-61.
- COSTA, J. 1999. Effect of irrigation water quality under supplementary irrigation on soil chemical and physical properties in the "Southern Humid Pampas of Argentina". *Journal of Crop Production* 2(2):85-99 and *Water Use in Crop Production* pp 85-99.
- DORAN, J.; M. SARRANTONIO y M. LIEBIG. 1996. Soil health and sustainability. In *Advances in Agronomy*, Vol 56. D. Sparks (ed). Academic Press, San Diego, pp 1-54.
- GENOVA, L. 1986. Estudio de la factibilidad técnica, económica y financiera de riego complementario en la zona típica maicera de la Pcia. de Buenos Aires. Informe de avance. Formulación de ensayos de campo para evaluar el impacto del riego en el suelo. Convenio IICA-SAGyP-INTA EEA Pergamino.
- GENOVA, L. 1988. Impacto de las aguas bicarbonatadas sódicas en suelos regados complementariamente en la región típica maicera de la Pcia. de Buenos Aires. Documento de informe de avance. Carta acuerdo RLAC-FAO-UNLP. La Plata. 88 pp.
- GENOVA, L. 1989. Taller FAO sobre Análisis de métodos empleados en la recuperación de tierras y la prevención de la degradación de tierras bajo riego y drenaje de América Latina. Riego complementario en el norte de Buenos Aires: bases para prevenir la degradación de suelos. Organizado por la RLAC-FAO y el Programa Nacional de Drenaje de Tierras del Perú PRONADRET. 24 y 29 de octubre de 1989. Chiclayo. 78 pp.
- GENOVA, L. 1992. Evaluación del impacto del riego complementario con aguas bicarbonatadas sódicas en los suelos del norte de la Pcia. de Buenos Aires. Actas del V Congreso Nacional de Maíz '92 y II Reunión Suramericana. Capítulo II 86:89 pp.
- GENOVA, L. 1993. Estudio de la degradación de suelos bajo riego complementario de cultivos extensivos con aguas subterráneas del acuífero Pampeano en el norte de Buenos Aires. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. 347:348 pp.
- GENOVA, L. 1996. Efecto de aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas en suelos pampeanos Argiudoles típicos de las Pcias. de Buenos Aires y Santa Fe, regados complementariamente por aspersión con equipos de pivote central. Informe Gerencia de Producción Dekalb SA. 62 pp.
- GORGAS, J.; E. LOVERA y J. TASSILE. 1996. Posibilidades de riego suplementario en cultivos extensivos de cosecha en la Pcia. de Córdoba. Sec. de Agric. y Recursos Hídricos. Córdoba. 15 pp.
- GRENON, D. 1988. Modificaciones producidas por el riego complementario en un suelo Argiudol de Pergamino, Bs As. Convenio IICA-SAGyP. 18 pp.
- HERRICK, J. and M. WANDER. 1998. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils. The importance of distribution, composition and soil biological activity. In *Soil Processes and the Carbon Cycle*. R. Lal *et al.* (eds). Adv. in Soil Sci. CRC Press, B. Ratón, Florida, pp 405-426.
- INSTITUTONACIONALDETECNOLOGÍA AGROPECUARIA. 1989. Carta de suelos de la República Argentina. Escala 1:40.000. Instituto de Suelos. CIRN. INTA. Castelar.
- IRURTIA, C. y R. MON. 1998. Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la Región Pampeana después de cinco años de riego suplementario. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz. 241-242 pp.
- LANG, I. 1994. Soil resilience in stressed agro-ecosystems. In *Proc. 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México. Vol 2 a:217-220.
- LAVADO, R. 1976/77. Salinización y alcalinización de suelos pampeanos bajo riego complementario. *Rev. de Investigaciones Agrícolas INTA* 13 (2):41-57.
- MARANO, R.; M. PILATTI y J.A. de ORELLANA. 2000. Aguas subterráneas del Centro de Santa Fe para riego suplementario. Estudio del efecto de la calidad del agua sobre propiedades del suelo mediante simulación física. Inédito.
- MARANO, R. 2000. Efectos del agua subterránea en suelos de la región centro-este de la Provincia de Santa Fe, regados suplementariamente. Tesis de Maestría en Ciencias Agronómicas. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza.

- MASERA O.; M. ASTIER y S. LOPEZ-RIDAURA. 1999. Sustentabilidad y evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMIS. Mundi-Prensa-GIRA-UNAM. México.
- PEINEMANN, N.; M. DIAZZORITA; M. VILLAMIL; H. LUSARRETA y D. GRUNEWALD. 1998. Consecuencias del riego complementario sobre las propiedades edáficas en la Llanura Pampeana. *Ciencia del Suelo* 16:39-42.
- PROGRAMA DE AGROECOLOGIA GIRA A.C. 2001. www.oikos.unam.mx
- RICHARDS, L. Editor. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Lab. de Salinidad del Dep. de Agric. EE. UU. Riverside. Washington. 172 pp.
- ROZANOV, B. 1994. Stressed soil system and soil resilience in drylands. In Proc. 15th World Cong. of Soil Sci. Acapulco, Méx. Pp. 238-245.
- SANTA CRUZ, J. 1986. Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera del riego complementario en la zona maicera típica de la Pcia. de Buenos Aires. Aguas subterráneas. Informe de avance. Convenio SAGYP-INTA-IICA. Buenos Aires.
- SASAL, C.; A. ANDRIULO; M. de GALETTO; C. FERREYRA; F. ABREGO; M. BUENO; F. RIMATORI y M. de la CRUZ. 2000. Efecto de la cobertura y de dos niveles de yeso sobre un suelo sodificado por riego complementario. Actas del XVII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Comisión IV, N° 54.
- SEYBOLD, C.; J. MAUSBACH; D. KARLEN y H. ROGERS. 1998. Quantification of soil quality. In soil processes and the carbon cycle. R. Lal *et al.* (eds). CRC Press, Boca Ratón, Florida. Pp 387-404.
- SEYBOLD, C.; J. HERRICK y J. BREJDA. 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Sci.* 164:4:224-234
- SVARTZ, H. 1993. Simulación de cambios en las propiedades físicas y físico-químicas en columnas de suelo de Pergamino bajo condiciones de riego complementario. Tesis maestría. Facultad de Agronomía, UBA. 65 pp.
- SZABOLCS, Y. 1995. Introduction to the symposium on "Stressed ecosystems and soil resilience". In Proc. 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, Méx. Vol 2 a:218-220.
- TECNOAGRO. 1993. Estudio de suelos de la Estancia Santa Ida. Buenos Aires.
- WILLIAMS, J. and C. CHARTRES. 1991. Sustaining productive pastures in the tropics. I. Managing the soil resource. *Trap. Gras.* 25:73-84.
- WARKENTIN, B. 1996. The changing concept of soil quality. *J. Soil Water Conserv.* 50:226-228
- WYCKERS, A. y L. GENOVA. 1987. Evaluación del efecto del riego complementario en el cultivo de maíz con aguas bicarbonatadas sódicas en la región típica maicera. Trabajo de Intensificación Fac. de Agronomía UBA. 45 pp.