

Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina

Leopoldo J. Génova

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Avda. 60 y 119. (1900) La Plata.
Tel.: 0221-423-6758 int. 405. Email: hidroagri@agro.unlp.edu.ar

Génova, Leopoldo J. (2011) Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. Rev.Fac.Agron. Vol 110 (2): 63-81.

La incorporación del riego en la Pampa Húmeda es todavía condicionada por la inconsistencia de la clasificación de la aptitud agrícola del agua del US Salinity Lab. Teniendo como hipótesis que los acuíferos Pampeano y Puelche son, en su mayoría, aptos para riego complementario, se clasificaron sus aguas mediante los métodos del US Salinity Lab., FAO y Proy. IPG-INTA y se discutieron sus aplicaciones. Durante 20 años, fueron analizadas muestras de aguas captadas en 66 perforaciones y más de 5000 muestras de suelos regados en las provincias de Santa Fe y Buenos Aires. Se seleccionaron como indicadores los parámetros: pH_a , CE_a y RAS_a para aguas y pH , CE_{ex} y PSI para suelos. Se practicaron balances hidrosalinos y se evaluó la eficiencia de adsorción de sodio de los suelos. El método del Proy. IPG-INTA, aunque requiere mayor desarrollo, resultó ser el más apropiado, pues agrega a los factores hidroquímicos, otros vinculados con las precipitaciones, láminas de riego y propiedades edáficas. Restringe el uso del 4,7% de las aguas clasificadas por salinidad y del 14% por sodicidad. Los resultados del estudio, coincidentes con los de otros investigadores y con los balances hídrico-salino-sódicos, evidencian que los pronósticos de sodificación edáfica del US Salinity Lab. son inapropiados para la región pampeana húmeda de Argentina, donde la resistencia y resiliencia de los suelos mantienen su calidad debido al efecto del lavado de sales por las lluvias y del intercambio catiónico. Los suelos regados nunca superaron valores medidos o simulados de $PSI=11,6$ (con promedios de 5,2 en posttemporada). Se concluye que la mayoría de las aguas estudiadas son aptas para riego complementario.

Palabras clave: aptitud agrícola del agua subterránea, métodos de clasificación, resiliencia edáfica

Génova, Leopoldo J. (2011) Groundwater quality for complementary irrigation in the Argentine Humid Pampas. Rev.Fac.Agron. Vol 110 (2): 63-81.

The incorporation of irrigation in the Humid Pampas is still conditioned by the inconsistency of the U.S. Salinity Lab classification of the water agricultural aptitude. With the hypothesis that the Pampeano and Puelche aquifers are mostly suitable for complementary irrigation, were classified waters by the U.S. Salinity Lab methods, FAO and Proj. IPG-INTA, and discussed their applications. Water samples drawn from 66 wells and over 5000 samples of irrigated soils were analyzed during 20 years, all located in Buenos Aires and Santa Fe provinces. The water salinity indicators selected were pH_a , EC_w and SAR_a and the ones for soils were pH , EC_{ex} and PSI . Water balance and sodium adsorption efficiency were carried out. The IPG-INTA method was the most appropriate to estimate the water quality, although it requires further development. Its proper predictive power is explained because it adds to the hydrochemical factors, some related to rainfall, irrigation depth and soil properties. In response to saline hazard, this method restricts the use about the 4.7% of waters classified, while attending the sodium hazard, limits on the order of 14% of groundwater. The results of the study are consistent with other researchers and the water balance, salt and sodium, and they show that predictions of soil sodicity of the U.S. Salinity Lab, are inappropriate for the Humid Pampas, where the soil resistance and resilience maintain quality, due to the effect of leaching of salts by rain and cation exchange. Irrigated soils never exceeded values measured or simulated $PSI = 11.6$, with averages in postseason $PSI = 5.2$. We conclude that most of the waters studied are suitable for supplemental irrigation.

Key words: groundwater agricultural aptitude, classification methods, soil resilience

Recibido: 08/08/2011

Aceptado: 18/11/2011

Disponible on line: 1/08/2012

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCION

El riego complementario de cultivos extensivos en la Pampa Húmeda es una práctica agronómica cuya incorporación y difusión fue discutida y resistida por la comunidad agraria, debido principalmente a los siguientes factores: a) Desconocimiento por parte de los principales actores del sector agropecuario (productores, técnicos, investigadores, empresarios, funcionarios) de los alcances y ventajas del riego de cultivos extensivos, que constituyó una innovación tecnológica para la región húmeda; b) Inconsistencia del método de clasificación de calidad del agua para riego del US Salinity Lab. (Richards ed., 1954), de uso universal en zonas áridas que impropriadamente aplicado al riego complementario clasifica a la mayoría de los recursos hídricos subterráneos disponibles en la región húmeda pampeana, como *poco aptos* e incluso *no aptos* para uso agrícola y c) Inexactitud de los pronósticos efectuados sobre la sodificación de los suelos regados complementariamente, principalmente cuando se utilizan aguas bicarbonatadas sódicas, las que constituyen la fuente más importante de agua para riego en la zona.

Sin embargo, el pragmatismo de los primeros adoptantes de esta tecnología y la evidencia de los resultados económicos obtenidos por una agricultura regada y mejorada por los avances del fitomejoramiento y del manejo de los cultivos, propiciaron el crecimiento del área bajo riego. La potencialidad de la generación de riqueza por parte del riego complementario es muy importante ya que podrían regarse, aprovechando los acuíferos Pampeano y Puelche, en equilibrio con sus recargas, un total de 2×10^6 ha, con la siguiente distribución de cultivos: maíz (50 %), soja de primera siembra (25 %) y rotación trigo-soja de segunda siembra (25 %). Se obtendría así un incremento de los rendimientos del orden de 4, 1,5 y 1,0 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente, respecto de los mejores cultivos en secano (Proy. IPG-INTA, 1998; SAGyP-INTA-IICA, 1988).

Considerando como hipótesis que las aguas disponibles en los acuíferos Pampeano y Puelches son, en su gran mayoría, aptas para ser utilizadas en riego complementario, los objetivos del presente trabajo son los siguientes: a) clasificar la aptitud agrícola de las aguas mediante tres metodologías, b) discutir la

aplicabilidad del método del US Salinity Lab., en función de los resultados de 20 años de monitoreo del impacto del agua subterránea en suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos, cultivados con maíz, soja y trigo, regados complementariamente.

Antecedentes

a. *Riego complementario en la región pampeana utilizando agua subterránea.*

En 1995 el PROSAP reportó que el área total regada en Argentina había disminuido a 1347070 ha, respondiendo a la problemática de las economías regionales. El mayor decremento ocurrió en las zonas áridas y semiáridas, mientras que la zona húmeda presentó un importante incremento, debido principalmente a la expansión de los cultivos de arroz en Entre Ríos y de cereales y oleaginosas con riego complementario en Buenos Aires y en el sur de Córdoba y Santa Fe. Tomando como base los datos del último Censo Agropecuario del año 2000, el PROSAP (2006) difundió la distribución del área regada por provincias y métodos de riego (Tabla 1). En ella puede verse que la región húmeda y subhúmeda ocupa el 28,6% del total regado y el 73,2% del total bajo riego por aspersión, lo que está indicando el sostenido crecimiento del riego complementario, que emplea preferentemente equipos de aspersión.

La principal característica del riego complementario es que las aplicaciones de agua al cultivo se realizan cuando la humedad del suelo se aleja del rango considerado óptimo, resultado de la dinámica hídrica generada principalmente por la recarga por lluvias y la descarga por consumo evapotranspirativo, durante las etapas fenológicas en que los cultivos presentan elevada sensibilidad al déficit hídrico. Esto permite alcanzar respuestas productivas máximas, cercanas al potencial genético de las plantas, aunque la cantidad total de agua regada no supere generalmente los 300 mm por campaña agrícola (Génova *et al*, 1998). Por lo tanto, el riego complementario difiere del riego integral, practicado en las zonas áridas, en el número de riegos y fundamentalmente en el volumen total de agua aplicada, ya que las láminas totales regadas oscilan entre 600 y 1200 mm, distribuidas durante todo el ciclo de los cultivos.

Tabla 1. Superficies bajo riego en Argentina. Fuente: PROSAP (2006)

Lugar	Superficie regada		Riego gravitacional		Riego por aspersión		Otros métodos de riego	
	(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%
República Argentina	1355600	100,0	946575	100,0	281360	100,0	127665	100,0
Pcia. de Buenos Aires	166483	12,3	69540	7,3	89662	31,9	7281	5,7
Pcia. de Córdoba	93835	6,9	36200	3,8	56850	20,2	785	0,6
Pcia. de Entre Ríos	71736	5,3	47919	5,1	19166	6,8	4.651	3,6
Pcia. de San Luis	18575	1,4	3569	0,4	14940	5,3	66	0,1
Pcia. de Santa Fe	37425	2,8	10030	1,1	25476	9,1	1919	1,5
Zona húmeda-subhúmeda	388054	28,6	167258	17,7	206094	73,2	14702	11,5

El recurso subterráneo es la principal fuente de agua para riego complementario, presenta distintos grados de mineralización, con preponderancia hidrogeoquímica de aguas bicarbonatadas sódicas (Ceci, 1969; Sala *et al*, 1975; Hernández *et al*, 1975; Auge y Hernández, 1983; Santa Cruz, 1986; Castiglione y Cejas, 1996; González y Hernández, 1997; Auge *et al*, 2002; Hernández, 2005).

González (2004) zonificó los ambientes geohidrológicos de la Provincia de Buenos Aires en 11 regiones hidrogeológicas (Fig. 1), clarificando la sistematización efectuada con cuadros sintéticos de la litología y comportamiento hidrogeológico de las unidades geológicas pertenecientes a cada región. Auge (2004) delimitó 9 ambientes hidrogeológicos en la Provincia de Santa Fe (Fig. 2) Las aguas subterráneas usadas para regar los lotes agrícolas estudiados, pertenecen a regiones y ambientes hidrogeológicos cuyos límites no coinciden con los de las cuencas hídricas superficiales. La correspondencia entre la ubicación geográfica de los pozos que captaron dichas aguas con los límites de cuencas hídricas superficiales y de regiones y ambientes hidrogeológico se observa en la Tabla 2.

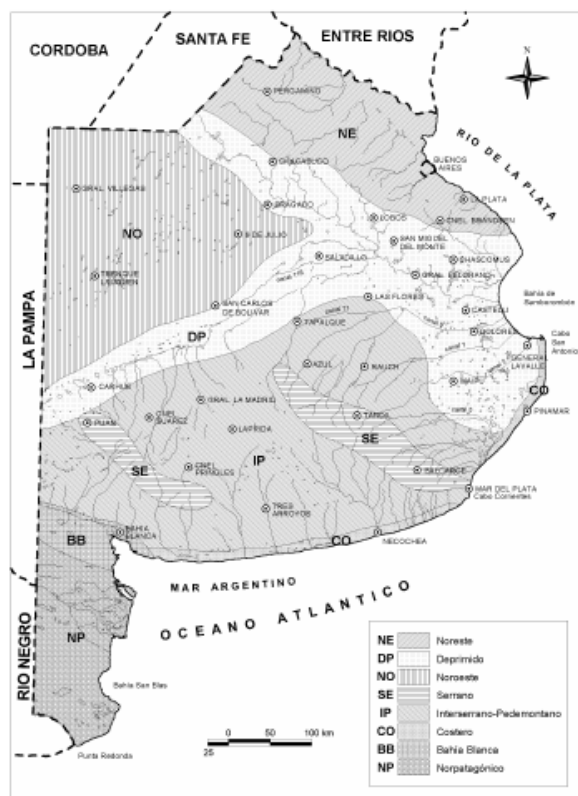


Figura 1. Regiones hidrogeológicas de la Provincia de Buenos Aires. Fuente: Auge (2004)

En la región pampeana, las unidades hidrogeológicas más aprovechadas para riego son los acuíferos Pampeano y Puelche. El primero se extiende en las provincias hidrogeológicas Llanura Chaco-Pampeana Árida (650000 km²) y Llanura Chaco-Pampeana Húmeda (350000 km²) que, en conjunto, ocupan el 37%

del área continental argentina. El Acuífero Puelche sólo se presenta en parte de la Llanura Chaco-Pampeana Húmeda. En ambas llanuras, predominan en el subsuelo sedimentos limoarenosos de color castaño y origen eólico, denominado Loess pampeano (Frenguelli, 1950, citado por Auge, 2004). Su gran extensión geográfica es interrumpida por otros tipos litológicos, como los depósitos arenosos formadores de médanos, los lacustres, en general pelíticos y los aluviales, en las cercanías a los cauces.

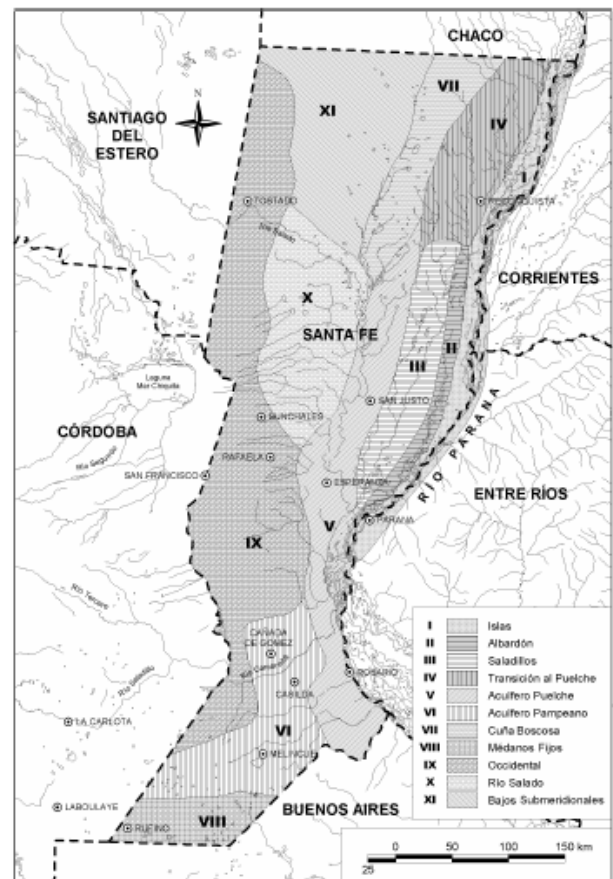


Figura 2. Ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Santa Fe. Fuente: Auge (2004)

Los acuíferos regionales presentan características y comportamientos hidráulicos, hidrodinámicos e hidroquímicos diferentes. En general, el agua subterránea de la Llanura Chaco-Pampeana Árida es más salina y la superficie freática aparece a mayor profundidad que la existente en la Llanura Húmeda. En el sector árido de la Llanura, los ríos son predominantemente influentes, es decir que aportan agua al subsuelo y la recarga ocurre preferentemente en las depresiones que concentran el escurrimiento superficial. El sector húmedo es geológica y geomorfológicamente similar al sector árido, las diferencias distintivas son generadas por el clima, que presenta excesos hídricos debido a que la precipitación supera a la evapotranspiración. La red hidrográfica es

Tabla 2. Pertenencia de las localidades estudiadas a las cuencas y a regiones hidrogeológicas. Fuente: Auge (2004) y González (2004).

Localidad	Código	Cuenca Hídrica Superficial	Código	Región Hidrogeológica
Carmen	33	SE de Sta. Fe y N de Buenos Aires	VI	Acuífero pampeano
Elortondo	33	SE de Sta. Fe y N de Buenos Aires	VI	Acuífero pampeano
Santa Emilia	33	SE de Sta. Fe y N de Buenos Aires	VI	Acuífero pampeano
Hughes	33	SE de Sta. Fe y N de Buenos Aires	VI	Acuífero pampeano
San Pedro	33	SE de Sta. Fe y N de Buenos Aires	1	Noreste
Pergamino	35	Cuenca del Río Arrecifes.	1	Noreste
Colón	35	Cuenca del Río Arrecifes.	1	Noreste
Rojas	35	Cuenca del Río Arrecifes.	1	Noreste
Salto	35	Cuenca del Río Arrecifes.	1	Noreste
C. de Areco	36	Arroyos del NW de Buenos Aires	3	Salado-Vallimanca
Junín	48	Cuenca del Río Salado	1	Noreste
Chacabuco	48	Cuenca del Río Salado	3	Salado-Vallimanca
Laprida	48	Cuenca del Río Salado	9	Interserrana-periserrana
Lincoln	48	Cuenca del Río Salado	9	Interserrana-periserrana
25 de Mayo	48	Cuenca del Río Salado	2	Noroeste
Gral Lamadrid	48	Cuenca del Río Salado	9	Interserrana-periserrana
Balcarce	50	SE de Buenos Aires	8	Serrana-periserrana
Lobería	51	Sur de Buenos Aires	9	Interserrana-periserrana
Necochea	51	Sur de Buenos Aires	9	Interserrana-periserrana
Alvarado	51	Sur de Buenos Aires	9	Interserrana-periserrana
Cnel. Suárez	98	Lagunera del SW de Buenos Aires	9	Interserrana-periserrana
Guaminí	98	Lagunera del SW de Buenos Aires	9	Interserrana-periserrana

restringida y los límites de cuenca difusos, a causa de la escasa pendiente topográfica. Los cuerpos de agua son en su mayoría efluentes, en los cuales descarga el agua subterránea que forma los ríos, arroyos, bañados y lagunas; la recarga preferencial en cambio ocurre en los altos del relieve.

Los principales acuíferos sometidos a explotación para riego son contenidos en las unidades geológicas postpampeano, pampeano y arenas puelches. La unidad postpampeano está representada por formaciones jóvenes que dan lugar a acuíferos libres (capa freática), consecuentemente ubicados a continuación del estrato edafizado, cercanos a la superficie y poco potentes, de escaso espesor, productores de bajos caudales. El Acuífero Pampeano, de espesores entre 0 y 120 m, litológicamente está constituido por limos loessoides, arenosos, arcillosos y calcáreos, de origen eolo-fluviales. En su fracción superior se comporta como acuífero libre, con baja productividad y a mayor profundidad pasa a ser semilibre, alcanzando una moderada productividad, con caudales entre 60 y 120 m³h⁻¹ y una salinidad de 0,5 a 2 g.l⁻¹ de concentración. El Acuífero Puelche está formado por arenas sueltas medianas y finas, de color amarillento a blanquecino, de origen fluvial, presenta espesores entre 10 y 50 m, con comportamiento semiconfinado, de mediana a alta productividad, permitiendo caudales entre 30 y 150 m³.h⁻¹, con

concentraciones salinas inferiores a 2 g.l⁻¹ en gran parte del territorio.

b. Salinidad y sodicidad de suelos y aguas.

Un aspecto aún no resuelto (Costa *et al.*, 1991), (Génova, 1992, 2003), (Costa 1998, 1999), (Carricaburu, 1998), (Vázquez *et al.*, 2006), sobre el que se está trabajando (Proyecto IPG-INTA, 1998; Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, 2000), es la carencia de una metodología adecuada para la interpretación y clasificación de la aptitud agrícola del agua para ser usada en el riego de la región húmeda pampeana, que permita, además, efectuar pronósticos confiables sobre la degradación salina en los sistemas agroproductivos regados. Este hecho todavía condiciona la adopción de la práctica del riego y su manejo.

Existen resultados de pronósticos y de diagnósticos referentes al impacto del riego con aguas subterráneas en los suelos pampeanos. Un grupo de autores, entre ellos Arens (1969), Lavado (1976), Cerana (1980), Boivin (1998), Irurtia y Mon (1998), Andriulo *et al.* (1998), Abrego *et al.* (1998), Vázquez *et al.* (2004) enfatizaron la inconveniencia de regar con dichas aguas. Arens (1969) estimó que el riego complementario utilizando aguas freáticas con contenidos de 610 mg.l⁻¹ de sales (CE= 0,95 dS.m⁻¹) y valores de RAS comprendidos entre 7 y 8, formaría -en

un período de 9 a 18 años- un suelo sódico desde superficie, llegando a un estado de equilibrio final en 18 a 24 años, por lo que desaconsejó su uso. Por su parte, Lavado (1976), menciona incrementos de salinidad y alcalinidad como consecuencia del riego complementario, en suelos de La Pampa. Cerana (1980) reporta un importante aumento de la sodificación en un Hapludol éntico de Córdoba, regado con aguas bicarbonatadas de baja salinidad. Iruña y Mon (1998) reportaron cambios producidos por 5 años de riego con pivote central en las propiedades físicas y químicas de un Argiudol típico pampeano: leves aumentos de salinidad, sodicidad y pH y claras tendencias de deterioro en parámetros físicos. Andriulo *et al.* (1998) encontraron un efecto acumulativo sobre un Argiudol típico de Pergamino luego de 11 años de riego complementario con aguas bicarbonatadas sódicas (aumentos marcados en el PSI y el pH y algo más leves en la CE). Si bien las propiedades evaluadas del suelo se acercaban a valores críticos que podrían estar indicando una evolución hacia un suelo sódico (el PSI alcanzado fue del 12,2 %), los autores no pudieron afirmar la disminución de la productividad del suelo, pues las respuestas del cultivo al riego fueron altas y los rendimientos, más estables y elevados que en las situaciones de secano. Abrego *et al.* (1998) determinaron que el aumento del PSI superficial de un Argiudol típico fue causado por el efecto acumulativo de 11 años de riego complementario con aguas ricas en sodio y bicarbonato, donde el poder dispersante del sodio sobre la materia orgánica manifestó consecuencias negativas sobre la estabilidad de la estructura del suelo y la dinámica del agua. Vázquez *et al.* (2004) reportaron, a partir de un ensayo en macetas con suelo Udipsament típico y simulando 0, 10, 15 y 20 años de riego con una lámina anual de 300 mm, una $CE_a = 0,75 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y un valor de $RAS = 6,6$; aumentos de pH hasta 6,9-7,2; Na^+ hasta $3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; HCO_3^- de 3,6 a $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ y RAS_{ex} de 3,5 a 5,2, estabilizados a partir de los 10 años que, aunque sin afectar la salinidad del suelo, definirían la práctica del riego como no sustentable.

Otro grupo de investigadores, Génova (1986, 1988, 1989, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 2003), Wyckers y Génova (1987), Grenón (1988), Svartz (1993), Iruña (1995), Costa (1999), Andriulo y Ferreyra (1997), Iruña y Mon (1998), Andriulo *et al.* (1998), Peinemann *et al.* (1998), Andriulo *et al.* (2000), Caviglia y Papparotti (2000), Caviglia *et al.* (2000), Marano (2000), Marano, Pillati y Felli (2000), Marano, Pillati y de Orellana (2000), Sasal *et al.* (2000), Pillati *et al.* (2002), Ghiberto *et al.* (2002), Caviglia y Costa (2002), Losinno *et al.* (2004) han reportado resultados de numerosos ensayos y seguimientos de riego, con una conclusión común: el incremento del PSI del suelo hasta alcanzar valores máximos que no invalidan el riego complementario, bajo adecuadas condiciones de monitoreo y manejo.

Génova (2007, 2009, 2010, 2011) informó que la resiliencia de suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos a la degradación salina y sódica, no es superada por el riego complementario con aguas bicarbonatadas sódicas, debido a procesos de recuperación, que mantienen la calidad de los suelos. Esta modalidad de riego conforma así un sistema de

manejo agronómico sustentable, conclusión resultante de un estudio de 20 años de monitoreo en el que los valores de pH, CE_{ex} y PSI de los suelos regados no manifestaron un crecimiento sostenido en el tiempo, sino la ocurrencia de fases de acumulación. Ello es debido al aporte de sales durante la temporada de riego y de fases de disminución, función del balance hídrico-salino generado en un determinado momento del ciclo, por los dos principales mecanismos de recuperación: lavado e intercambio catiónico. Se valida así el modelo conceptual formulado por Génova (1992, 1993) sobre el control natural de la salinidad y sodicidad de los suelos pampeanos regados complementariamente.

MATERIALES Y METODOS

El territorio estudiado, con un área de alrededor de 215500 km^2 , está comprendido entre las latitudes 32°N y 39°S y las longitudes 57°E y 63°O del Hemisferio Sur e incluye siete cuencas hidrográficas de los Sistemas del Río Paraná, del Río de la Plata y de la Provincia de Buenos Aires, correspondientes a la Vertiente Atlántica de la República Argentina, delimitadas por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina, 2.002)(Figura 3).

El monitoreo de los suelos regados se efectuó en 80 lotes agrícolas de superficie variable, entre 35 a 60 ha, pertenecientes a 34 establecimientos agropecuarios ubicados en las provincias de Santa Fe y Buenos Aires. La degradación salina de los suelos, generada por la aplicación de sales con el agua de riego, fue considerada aquí un punto crítico para los dos agroecosistemas estudiados: SISMASEC, que representa el manejo agronómico la producción agrícola en secano y SISMARIE, que incorpora el riego complementario.

Se seleccionaron los siguientes indicadores, obtenidos de acuerdo con el Programa Métodos Analíticos de Referencia AACS (1995) (1) Para suelos: pH (potencial de hidrógeno en pasta, por potenciometría); CE_{ex} (conductividad eléctrica del extracto de saturación, por conductimetría eléctrica, expresada en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$); cationes intercambiables (por titulación en $\text{me}\cdot\text{l}^{-1}$); CIC (capacidad de intercambio catiónico, por desplazamiento del NH_4^+ con Cl_2Ca y ClNa y titulación, en $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) y PSI (% sodio intercambiable). (2) Para aguas: pH_a , conductividad eléctrica CE_a y relación de adsorción de sodio RAS_a . Los valores de pH, CE_{ex} y PSI surgieron de las determinaciones analíticas de las muestras de los horizontes superficial (HS) y subsuperficial (HSS) obtenidas en lotes agrícolas, con 4 o más repeticiones y extraídas en dos épocas: en el mes de octubre, antes de iniciar la temporada de riego e inmediatamente después de finalizada la misma, en el mes de marzo.

La calificación de las aguas para riego se realizó aplicando tres métodos: el Diagrama de Clasificación de la Aptitud Agrícola de las Aguas de Riego del US Salinity Lab. (Richards ed., 1954), el difundido por la FAO (Ayers y Westcot, 1987) y el propuesto por el Proyecto IPG-INTA (1998).

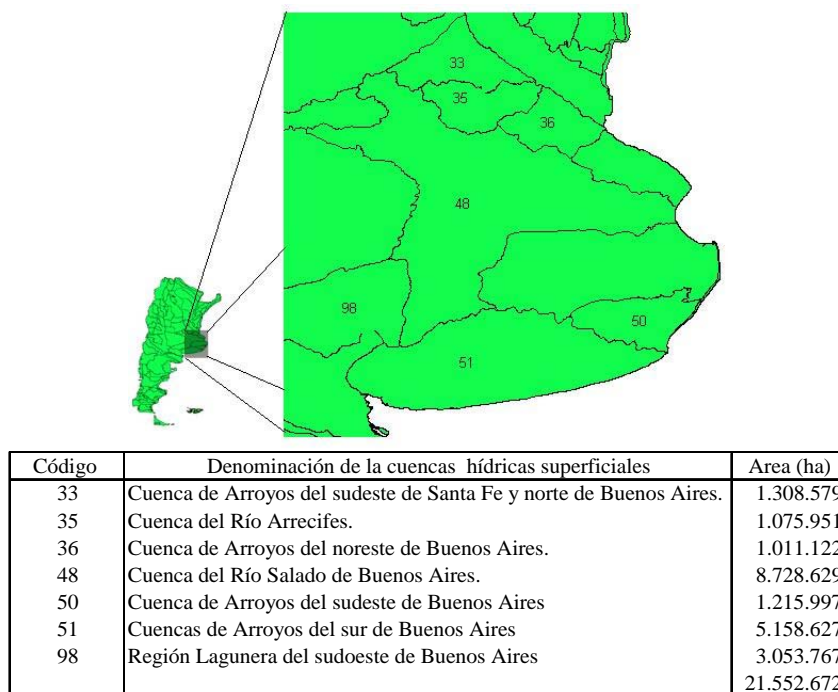


Figura 3. Cuencas hídricas estudiadas. Fuente: Atlas digital de los recursos hídricos de la R. Argentina (2002).

El método del US Salinity Lab. (1954) estima la aptitud del agua para riego relacionándola con la peligrosidad de salinización y sodificación del suelo. Las clases de peligrosidad salina son: Clase C1= CE_a entre 100 y 750 $\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$, Clase C2 = CE_a entre 750 y 2.250 $\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$, Clase C3= CE_a entre 2.250 y 4.000 $\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$ y Clase C4= CE_a entre 4.000 y 6.000 $\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$. Las clases referidas a la peligrosidad sódica se definieron mediante las siguientes ecuaciones, correspondientes a las tres rectas del Diagrama a escala semilogarítmica, que vincula la CE_a con la RAS, calculadas por Bernardo (1995): Clase S1= ($RAS_a < 18,87 - 4,44 \log CE_a$) (ec. 1), Clase S2= ($18,87 - 4,44 \log CE_a < RAS_a < 31,31 - 6,66 \log CE_a$) (ec. 2), Clase S3= ($31,31 - 6,66 \log CE_a < RAS_a < 43,75 - 8,87 \log CE_a$) (ec. 3) y Clase S4= ($RAS_a > 43,75 - 8,87 \log CE_a$) (ec. 6) donde: RAS_a = relación de adsorción de sodio, en $(\text{meq/l})/(\text{meq/l})^{1/2}$ y CE_a = conductividad eléctrica, en $\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$.

El método de la FAO propone la consideración de directrices, explicitadas en términos graduales de restricción al uso, para interpretar la calidad del agua para riego (Tabla 3).

El método propuesto por el Proy. IPG-INTA (1998) es preliminar, aún en proceso de validación definitiva, pero valioso, porque incorpora conceptos clásicos de las relaciones salinas y sódicas de aguas y suelos regados, ajustando la clasificación con datos de campo para los suelos de las regiones pampeanas con mayor desarrollo del riego complementario. La propuesta de evaluación de la calidad del agua para riego complementario se basa en el análisis conjunto de la naturaleza química del agua, de las propiedades del suelo, de las características climáticas zonales y de la lámina de riego aplicada, confrontados con la respuesta

de los principales cultivos extensivos regados. Aunque los estudios que fundamentaron la propuesta abarcaron sólo tres años de actividad del proyecto, tomando resultados experimentales, antecedentes de investigación y monitoreo de casos, no se dispone de información de lotes regados más de 4 a 5 años por lo que la propuesta ha sido formulada como una aproximación, cuyo valor es ayudar a profundizar en el conocimiento sobre el tema. La Tabla 4 resume las principales características del método.

La peligrosidad de sodificación del suelo por aporte de aguas bicarbonatadas sódicas, se evaluó a través del cálculo de la eficiencia de la absorción de sodio (EfNa) por parte de algunos suelos, utilizando el modelo propuesto por Marano (2004), sintetizado en la ecuación (7). Se correlacionaron valores de PSI pronosticados con similares obtenidos en los lotes regados, aplicando la ecuación (8). Este modelo fue construido en base a la ecuación de Gappón, citada por Fassbender y Bornemisza (1987), que explica el intercambio de los cationes Na y Ca disueltos en la solución del suelo con los adsorbidos por la fase sólida del suelo, proponiendo un coeficiente de selectividad de la isoterma de adsorción, que no es constante para los suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos (Marano, 2004).

$$EfNa = 100 (Na \text{ ad. } Na \text{ ap}^{-1}) \quad (\text{ec. 7})$$

donde:

EfNa = eficiencia de adsorción de sodio, en %.

Na ad= concentración de sodio adsorbido por una capa de suelo, en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

Na ap = concentración de sodio aplicado por el agua de riego, en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$\Delta \text{PSI} = 10 (\text{EfNa} \cdot \text{LR} \cdot \text{Na}_r) (\text{CIC} \cdot d_{\text{ap}} \cdot \rho_r)^{-1} \quad (\text{ec } 8)$$

donde:

ΔPSI = incremento del PSI, en %

EfNa = eficiencia de adsorción de sodio, en tanto por uno.

LR = lámina de riego, en mm

Na_r = concentración de Na^+ en el agua de riego, en $\text{cmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$

CIC = capacidad de intercambio catiónico, en $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$

d_{ap} = densidad aparente del suelo, en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

ρ_r = profundidad del horizonte o capa de suelo, en m.

Por último, para explicar la dinámica hidrosalina ocurrida en los suelos regados, se utilizó el Programa Balansal (Mirábile y Fornero, 1987). El programa realiza dos tipos de balances en el perfil del suelo ocupado por

raíces, uno hídrico y otro salino. El balance hídrico contabiliza los ingresos por precipitación efectiva y los egresos por evapotranspiración de los cultivos, teniendo en cuenta dos características del suelo (contenido hídrico a la capacidad de campo y eficiencia de lavado, según textura y modalidad de riego como melgas, surcos, aspersión, etc.). El balance salino es resuelto en base a las ecuaciones de flujo de masa de Van der Molen, citadas por Mirábile y Fornero (1987). Además de estimar los cambios de salinidad del suelo mediante el balance hídrico y las concentraciones de sales del agua de riego y del suelo antes de iniciar los riegos, el modelo estima la lámina que es necesario percolar para alcanzar una determinada salinidad final del suelo (salinidad objetivo) y, consecuentemente, la lámina de agua total requerida para satisfacer las demandas evapotranspirativas y de lavado.

Tabla 3. Directrices para interpretar la calidad del agua para riego. Fuente: FAO Serie Riego y Drenaje N° 29 rev. 1.

Causa y efecto	Grado de restricción de uso			
	Ninguno	Ligero a moderado	Severo	
	(N)	(L a M)	(S)	
Salinidad (disminuye la disponibilidad de agua para los cultivos)	CEa < 0,7	CEa 0,7 - 3	CEa > 3	
	RAS 0 - 3	CEa > 0,7	CEa 0,7 - 0,2	CEa < 0,2
Sodicidad (disminuye la permeabilidad del suelo)	RAS 3 - 6	CEa > 1,2	CEa 1,2 - 0,3	CEa < 0,3
	RAS 6 - 12	CEa > 1,9	CEa 1,9 - 0,5	CEa < 0,5
	RAS 12 - 20	CEa > 2,9	CEa 2,9 - 1,3	CEa < 1,3
	RAS 20 - 40	CEa > 5,0	CEa 5,0 - 2,9	CEa < 2,9

Tabla 4. Propuesta de evaluación de la calidad de aguas para riego suplementario en la Región Pampeana. Fuente: (Proy. IPG-INTA)

Causa	Indicador	Características agroclimáticas	Uso en cultivos extensivos		
			Seguro	Dudoso	No recomendado
			(S)	(D)	(NR)
Salinidad	CE a (dS/m)	Zona húmeda donde excesos pluviales de otoño permiten el lavado de sales del suelo y el nivel freático profundiza más de 3 m	< 2	2 a 4	> 4
Sodicidad	RAS		Aceptable	Dudoso	Alto riesgo
			(A)	(D)	(AR)
		Suelos del sudeste de Bs. Aires	< 15	15 - 20	> 20
		Arguidoles del norte de Bs. Aires, sudeste de Santa Fe y Entre Ríos.	< 10	10 - 15	> 15
		Arguidoles del nordeste de Sta Fe	< 7	7 - 12	> 12
		Haplustoles del centro-sur de Córdoba	< 5	5 - 10	> 10

RESULTADOS Y DISCUSION

La Tabla 5 resume el alcance de los principales componentes del estudio realizado sobre el impacto del riego complementario en los suelos pampeanos.

Con los resultados de los análisis de las 66 muestras de aguas captadas en las perforaciones utilizadas para regar los lotes estudiados, se obtuvieron los indicadores necesarios para clasificarlas de acuerdo con su aptitud agrícola. En principio -con fines identificatorios- se empleó el método del US Salinity Lab., comúnmente conocido como Diagrama de Clasificación de la Aptitud Agrícola del Agua para riego de Riverside, para luego proceder a la zonificación de los sitios muestrales por cuenca hídrica superficial. La Tabla 6 muestra los valores medios, correspondientes a cada clase de aptitud. Los valores promedio del total de muestras fueron: $\text{pH} = 7,72$; $\text{CE}_a = 1,15 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; $\text{RAS}_a = 12,83$ y carbonato de sodio residual $\text{CSR} = 8,74 \text{ me}\cdot\text{l}^{-1}$.

Esta primera caracterización se realizó reconociendo que dicho método presenta atributos asociados con la practicidad, sencillez y difusión generalizada, aunque se advierte que en las regiones húmedas, pierde efectividad para pronosticar la peligrosidad de salinización y sodificación de los suelos regados, tal como se discute a la luz de los resultados de este trabajo, coincidente con los reportados por Costa (1999) y Marano *et al* (2000).

En la Figura 4 se pueden observar las frecuencias de ocurrencia de las clases de calidad de agua en las distintas cuencas hídricas. Del total de aguas consideradas, más del 33 % correspondieron a la clase C3S2, siguiéndole C3S4 (26 %) y C3S3 (21 %). El valor de salinidad (CE_a) más frecuente osciló entre 0,7 y 1,2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y la sodicidad se distribuyó entre valores de RAS_a de 10 y 20; más del 86 % correspondió a la subclase C3 de salinidad, con valores de CE_a entre 0,75 y 2,25 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Esta distribución no pretende ser representativa de la calidad de todas las aguas de los acuíferos Pampeano y Puelche de la región utilizadas en riego complementario sino sólo de las consideradas en este estudio, en el que se enfatizó el análisis del impacto en el suelo de las aguas alumbradas, aunque se estima que el tamaño de la muestra resulta suficiente para acreditar el alcance de las conclusiones sobre pronósticos y diagnósticos de la aptitud del recurso hídrico subterráneo.

En la Tabla 7 se presentan las clasificaciones de la calidad de las aguas involucradas en este trabajo, elaboradas con los métodos del US Salinity Lab. (Richards *ed.*, 1954), de la FAO (Ayers y Wescot, 1989) y del Proy. IPG-INTA (1998).

No se considera pertinente hacer un análisis comparativo exhaustivo de los resultados de las distintas clasificaciones de aptitud de las aguas utilizadas en el riego de los sitios estudiados, a partir de los tres métodos aplicados. Sólo el último, más moderno, es específico para condiciones de clima húmedo-subhúmedo y riego complementario. Sin embargo, es evidente que el método propuesto por FAO toma en cuenta con mayor énfasis las relaciones entre las magnitudes de CE_a y RAS_a , asignando aptitud a las aguas que mantienen un equilibrio entre la concentración total de sales y la concentración relativa de Na. Esto es importante para interpretar con mayor

precisión el hecho de que la aptitud se mantiene cuando crecen ambos indicadores y disminuye cuando se trata de aguas pobres en sales pero con altos valores de RAS_a . Esta relación se explica porque el aporte de sales al suelo incrementa el Z-potencial entre las densidades de carga de los iones adsorbidos en la fracción coloidal y los iones disueltos en la solución edáfica, que gobiernan la capacidad de intercambio catiónico. Aguas poco salinas pero ricas en Na, aumentan la peligrosidad de sodificación del suelo.

Tampoco se tomaron en cuenta, para el análisis comparativo entre los métodos, las recomendaciones de manejo de agua, suelo y planta que propone Riverside, basadas en los conocimientos disponibles a mediados del siglo XX sobre la fisiología vegetal y relacionados con los rendimientos relativos de los cultivos, asociados con los grados de tolerancia salina. Por otro lado, la propuesta de cálculo de los requerimientos de lixiviación RL como procedimiento de control de la salinidad de los suelos regados, no es aplicable al riego complementario, donde habitualmente las sales aportadas con el riego, son lixiviadas por el exceso de precipitaciones. En condiciones de aridez y riego integral, el método de Riverside considera, para el cálculo del RL, una disminución en los rendimientos de los cultivos del orden del 50 %, por el efecto salino.

El avance de la investigación y experimentación agrícolas sobre las respuestas agroproductivas en presencia de salinidad creciente y muy especialmente los aportes de Maas & Hoffman (1977) y Maas (1990) sobre la tolerancia de los cultivos a las sales, han permitido a FAO formular su método de clasificación. Los modelos de cálculo de RL en función de un mayor rango de disminución de rendimientos debidos a la salinidad y para distintos métodos de riego, permiten programar aplicaciones de láminas con variadas frecuencias (desde el riego continuo mediante sistemas de goteo hasta intervalos de riego de más de 10 días con métodos de aspersión y gravitacionales).

Resulta promisorio clasificar la aptitud del agua en las condiciones reales de uso, atendiendo a los mecanismos de recuperación del suelo (lavado e intercambio catiónico), donde las precipitaciones y la capacidad de intercambio juegan un rol decisivo en los equilibrios salino-sódicos (Génova, 2003, 2007), mediante la caracterización de la resistencia y la resiliencia de los suelos a las degradaciones salinas y sódicas. Éstas garantizan la sustentabilidad de los sistemas de cultivo con manejo extensivo bajo riego complementario.

En lo que respecta a la calidad del agua en función de la salinidad (CE_a), en zonas húmedas, con lluvias otoñales que permiten lavar sales acumuladas en el suelo y, con una capa freática a más de 3 m de profundidad el límite máximo tolerado de 2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, límite que se considera realista. En la evaluación de la calidad del agua referente a la sodicidad es muy claro el criterio de aceptación de aguas más sódicas para regar suelos con alto contenido de MO, presencia de arcillas entre 25 y 26 %, CIC superior a 22 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y requerimientos de riego entre 60 y 160 mm por año. Éstos van disminuyendo a medida que los suelos tienen menor porcentaje de MO y arcilla, menor CIC y requieren láminas más altas de riego (150 a 200 mm anuales). El método propuesto por el Proy. IPG-INTA,

restringe el uso del 4,7% (salinidad) y del 14% (sodicidad) de las aguas clasificadas.

Como todos los métodos clasificatorios que utilizan rangos de valores para asignar intervalos de clase, que implican categorías (en este caso de uso del agua para riego) vinculadas con recomendaciones o directrices basadas en posibles efectos sobre plantas y suelos, los límites numéricos rigurosos de dichos intervalos deberían tomarse en un sentido orientativo. Deben considerarse como indicadores de tendencias esperables, en nuestro caso, del impacto negativo sobre el agroecosistema producido por las sales con el agua de riego. Hecha esta consideración y observando las tres clasificaciones elaboradas con los valores medios de los indicadores por nosotros obtenidos (Tabla 7), se verifican mayores coincidencias en cuanto a salinidad que a sodicidad. En el método del IPG-INTA intervienen, además de los hidroquímicos, otros factores que permiten interpretar más integralmente la aptitud de las aguas para riego, por ejemplo el régimen

de lluvias que definen requerimientos de riego y las propiedades de los suelos.

Se ha tratado hasta aquí uno de los ejes del presente trabajo, relacionado con la identificación de las aguas de los principales acuíferos. A continuación se analizará la capacidad de pronóstico de degradaciones salinas y sódicas que implican los métodos clasificatorios de la aptitud agrícola de dichas aguas.

El monitoreo realizado durante el período 1986-2005 de suelos regados con las aguas relevadas, permitió discutir la validez del método de Riverside y comprobar la bondad de los aciertos metodológicos de la propuesta del Proy. IPG-INTA. Los valores medios obtenidos de los lotes regados que integraron los SISMARIE oportunamente estudiados, constan en la Tabla 8. Las Figuras 5 y 6 presentan los valores de los indicadores salinos registrados en pre y postemporada de riego, con aguas de distinta calidad, para los horizontes superficial y subsuperficial, respectivamente.

Tabla 5. Componentes del estudio sobre el impacto del riego en los suelos.

COMPONENTES DEL ESTUDIO		SISMASEC		SISMARIE	
Período 1986-2005	20 años				
Area abarcada	215.000 km ²				
Cuencas hídricas superficiales	7				
Regiones hidrogeológicas	6				
Estancias	34				
Localidades	23				
Lotes agrícolas	140	60	60	80	80
Pozos (aguas subterráneas)	66				
Número de datos de indicadores		HS	HSS	HS	HSS
Promedios de pH		27	27	208	207
Promedios de CEx		27	27	225	224
Promedios de PSI		27	27	222	223
Valores medios por horizonte		81	81	655	654
Subtotal de promedios en Sismasec			162		
Subtotal de promedios en Sismarie					1309
Total de valores medios					1471

Tabla 6. Valores medios de los indicadores salinos y sódicos de las clases de aguas usadas para el riego de los suelos estudiados.

Clase aptitud	pHa	CEa (dS/m)	RASa	CSR me/l
C2S1	7,30	0,66	2,20	6,90
C2S2	7,66	0,72	7,89	6,70
C3S1	7,48	0,96	4,10	
C3S2	7,82	1,06	9,54	9,26
C3S3	7,91	1,24	13,07	7,93
C3S4	7,60	1,16	20,24	9,78
C4S4	7,65	3,40	24,10	5,85

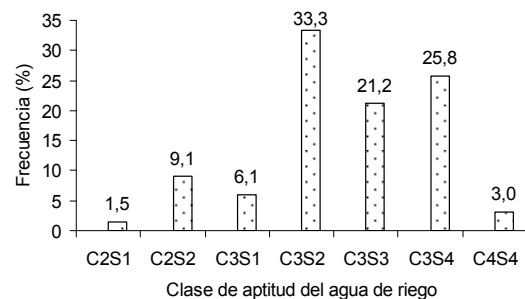


Figura 4. Frecuencia de ocurrencia de las clases de aptitud de las aguas de riego.

Tabla 7. Clasificación de la aptitud de las aguas para riego.

Código de cuenca	CEa dS.m ⁻¹	RASa	US Salinity Lab. (Riverside) Clase de aptitud	Directrices FAO		Directrices IPG-INTA	
				Grado de restricción de uso Por sales	Por sodio	Uso del agua Por sales	Por sodio
33	0,75	7,20	C2S2	L a M	L a M	S	A
	1,02	15,40	C3S3	L a M	SV	S	AR
	1,22	20,45	C3S4	L a M	SV	S	AR
35	0,72	8,20	C2S2	L a M	L a M	S	A
	0,96	3,60	C3S1	L a M	L a M	S	A
	0,98	10,38	C3S2	L a M	L a M	S	D
	1,20	12,45	C3S3	L a M	SV	S	D
36	0,70	6,95	C2S2	L a M	L a M	S	A
	0,93	9,78	C3S2	L a M	L a M	S	A
48	0,66	2,20	C2S1	N	L a M	S	A
	0,68	10,20	C2S2	N	L a M	S	D
	0,97	5,50	C3S1	L a M	L a M	S	A
	1,19	7,78	C3S2	L a M	L a M	S	A
50	1,00	14,00	C3S3	L a M	SV	S	A
	1,10	20,06	C3S4	L a M	SV	S	D
51	1,45	16,45	C3S4	L a M	L a M	S	D
	3,40	24,10	C4S4	SV	L a M	D	AR
98	0,75	7,83	C2S2	L a M	L a M	S	A
	0,95	3,65	C3S1	L a M	L a M	S	A
	1,11	9,05	C3S2	L a M	L a M	S	A
	1,25	11,97	C3S3	L a M	L a M	S	D

Referencias

Método	Símbolo	Directriz de uso del agua para riego
FAO	N	Ningun grado de restricción al uso
FAO	L a M	Ligero a moderado grado de restricción al uso
FAO	SV	Severo grado de restricción al uso
IPG-INTA	S	Uso seguro respecto a la salinidad
IPG-INTA	D	Uso dudoso respecto a la salinidad
IPG-INTA	NR	Uso no recomendable respecto a la salinidad
IPG-INTA	A	Uso aceptable respecto a la sodicidad
IPG-INTA	D	Uso dudoso respecto a la sodicidad
IPG-INTA	AR	Uso de alto riesgo respecto a la sodicidad

Tabla 8. Valores promedio de los indicadores salinos de los suelos regados.

Variables estadísticas	Horizonte superficial			Horizonte subsuperficial		
	pH	CE _{ex}	PSI	pH	CE _{ex}	PSI
		(dS/m)	(%)		(dS/m)	(%)
N° de datos	208	225	222	207	224	223
Media aritmética	6,24	0,47	3,22	6,43	0,42	3,10
Mediana	6,18	0,43	2,89	6,33	0,39	2,90
Desviación estandar	0,45	0,18	1,66	0,52	0,16	1,77
Varianza	0,67	0,42	1,29	0,72	0,40	1,33
Coefficiente de variación	7,16	37,75	51,58	8,15	36,85	57,01
Valor máximo	8,10	1,19	9,33	8,10	0,93	11,67
Valor mínimo	5,40	0,11	0,50	5,55	0,11	0,53

En general se puede observar que no se registran datos que manifiesten degradaciones graves en los horizontes edáficos. Los coeficientes de variación (CV) del pH (7,1 para HS y 8,1 % para HSS) son muy bajos respecto a los de CE_{ex} (37,7 y 36,8 %, respectivamente) y al PSI (51,5 y 57%), evidenciando que las diferencias entre horizontes son pequeñas. El pH del HS fue ligeramente más ácido que en profundidad, mientras

que la CE_{ex} y el PSI, son muy similares entre horizontes.

Las Figuras 5 y 6 permiten observar que los valores medios de los indicadores de salinidad y sodicidad de los suelos regados con aguas de distinta calidad, tanto en el horizonte superficial como en el subyacente, obtenidos en la pretemporada de riego, fueron siempre superados por los de posttemporada, evidenciando el aporte de sales y sodio vinculado con el riego.

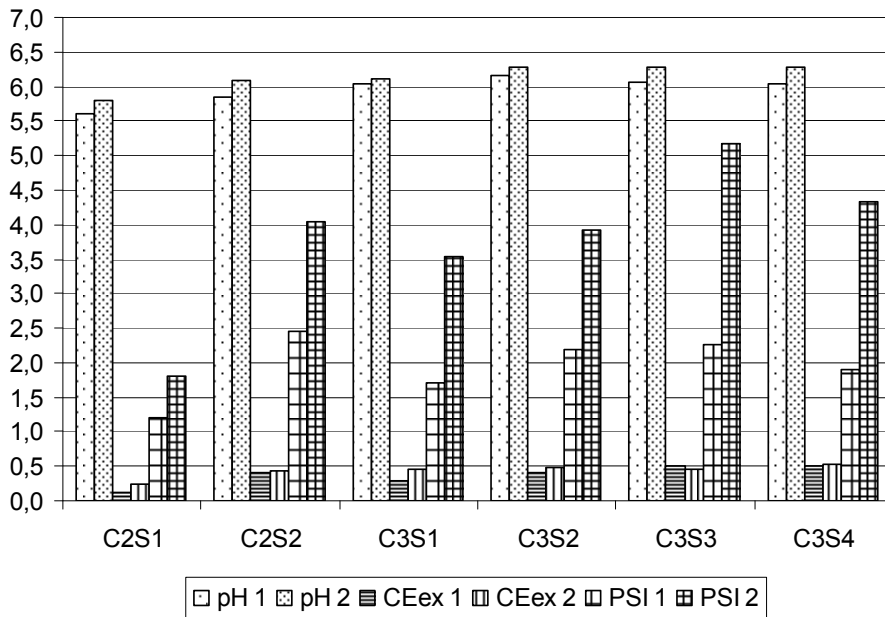


Figura 5. Indicadores del horizonte superficial de suelos regados en pre (1) y posttemporada

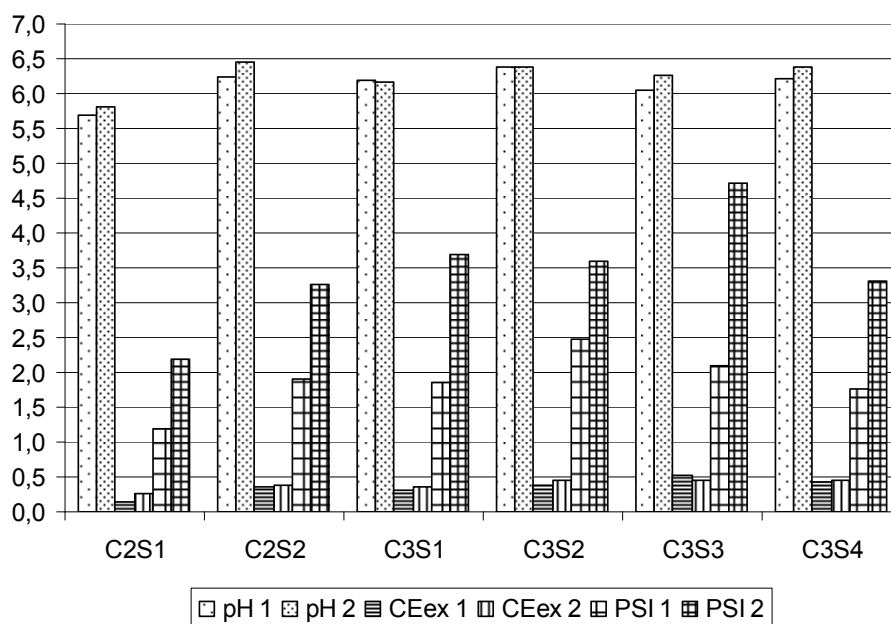


Figura 6. Indicadores del horizonte subsuperficial de suelos regados en pre (1) y posttemporada (2)

Sin embargo, la característica más importante de la evolución de dichos indicadores en el tiempo, es una visible alternancia (Figura 7) ya que a los incrementos salinos y sódicos durante el riego con aguas bicarbonatadas sódicas, le siguen decrementos estacionales, debidos a la ocurrencia de dos principales mecanismos de recuperación: el lavado por las lluvias y el intercambio catiónico a expensas de la dilución del calcio edáfico y su actividad en soluciones del suelo diluidas (Génova, 2003). Se corrobora así el modelo conceptual de control natural del halomorfismo anticipado por Génova (1993).

Los pronósticos de sodificación del suelo debida al riego con aguas de RAS_a elevada, obtenidos aplicando el método del US Salinity Lab. en las condiciones de la región húmeda pampeana plantearon grandes dudas sobre el impacto del riego complementario y sus consecuencias en la sustentabilidad de los agroecosistemas. Equivocadamente se utilizó la ecuación de regresión:

$$PSI = 1,1355 RAS_a + 0,0265 \quad r^2=1 \quad (ec.9)$$

reformulada de la original de Richards (1954), desconociendo que fue construida con datos surgidos del riego integral de cultivos instalados en condiciones de aridez, en las que existen tres diferencias de enorme peso en el balance hídrico-salino del suelo: el alto volumen de agua aplicado durante el ciclo de cultivo, la escasa precipitación y la baja capacidad de intercambio catiónico de los suelos aluviales.

En los oasis regados de la zona árida argentina, los pronósticos de PSI a partir de la RAS_a obtenidos con el mencionado modelo, son acertados porque la solución del suelo regado es generada casi exclusivamente por la cantidad y grado de mineralización aportados por el agua de riego (del orden de 600 a 1200 mm por ciclo de cultivo anual o perenne, respectivamente). La lluvia prácticamente no participa en la hidrodinámica y consecuentemente tampoco en la halodinámica. De

esta manera, la solución de los suelos regados presenta características químicas similares a las del agua que han recibido, puesto que se alcanzan condiciones de equilibrio a raíz de los flujos hídricos verticales y horizontales. Generalmente la concentración salina de la solución de suelo, indicada por la CE_{ex} , es 1,5 a 2 veces la concentración del agua CE_a , y la cantidad del sodio adsorbido por el complejo de intercambio alcanza valores muy correlacionados con la sodicidad relativa del agua de riego. Esto no ocurre en la región húmeda, donde el régimen de precipitación anual es del orden de 800 a 1200 mm, los suelos tienen altas CIC (mayores de 18 cmol.kg^{-1}) y las láminas de riego raramente superan los 300 mm por temporada.

Reemplazando en la (ec.9) los valores de sodicidad relativa de las aguas estudiadas puede verse que aquellas que registran una RAS_a superior a 13,2, pronostican un PSI del suelo regado mayor del 15%, límite establecido para que un suelo sea considerado sódico. Sin embargo, de los 1780 datos disponibles en este estudio, ningún valor medido de PSI, superó el 11,6 %. Por otro lado, tampoco se encontraron pronósticos de valores de PSI superiores al 11% con las concentraciones sódicas presentes en las aguas de los acuíferos considerados, aplicando el modelo de Marano (2004).

Coincidentemente con la mayoría de los investigadores respecto del impacto de los indicadores salinos y sódicos del riego complementario en los suelos pampeanos, puede verse que el más relevante de ellos es el PSI dado que la incorporación de sodio al complejo de intercambio causa degradación edáfica, porque altera la estructura de los suelos por defloculación coloidal, reduce la capacidad de infiltración y la disponibilidad hídrica para las plantas.

En la evaluación de la relación entre los valores de la RAS_a de las aguas de riego y el PSI de los suelos

regados (Fig. 8), se puede observar que, en términos generales y para el perfil total de los suelos, se verifican dos patrones claramente visibles: (1) los PSI obtenidos en posttemporada de riego superan a los de pretemporada y (2) las aguas de mayor RAS_a determinan los más altos PSI.

Sin embargo, el grado de correlación entre la RAS_a y el PSI medido no fue alto, debido a que las aguas más sódicas (Clase C3S4) no generaron los mayores PSI. En cambio, para el resto de las clases de agua, se observó una tendencia creciente de los valores de PSI a medida que los suelos recibieron aguas con mayores valores de RAS_a. En cambio, las diferencias de pH de los suelos regados con aguas de distinta clase, no fueron estadísticamente significativas y las aguas más salinas generaron valores algo más altos de salinidad de la solución del suelo. Sin embargo, la correlación entre las CE_a y CE_{ex} no puede explicar individualmente la dinámica salina del suelo debido a la acción del régimen de precipitación regional, que origina procesos de lavado de sales (Génova, 2007). Ésto ha sido también reconocido por Marano (2004), Costa (1999), Andriulo *et al* (1998), Irurtia y Mon (1998), entre otros.

Por último, fueron corroborados los efectos de la lluvia sobre los procesos de lavado de sales aportadas por el riego complementario, mediante el uso del programa Balansal (Mirábile y Fornero, 1986), encontrándose un

alto grado de correlación entre los valores de CE_{ex} medidos a campo y los pronosticados por el modelo.

La ocurrencia periódica de excesos hídricos, cuando éstos superan la máxima capacidad de retención de humedad del suelo, genera un flujo vertical de agua que atraviesa el perfil edáfico. Este flujo por un lado solubiliza sales precipitadas y por otro diluye la solución del suelo, dando oportunidad a que la percolación lixivie las sales, transportándolas hacia el subsuelo. Se controla de esta manera la salinización de las capas más superficiales del suelo, que podría generarse debido a tres procesos: a) concentración de la solución del suelo y consecuente precipitación de sales de baja solubilidad por evaporación y evapotranspiración del suelo vegetado y por evapotranspiración del acuífero freático, cuando se encuentra relativamente cercano a superficie. De esta manera se produce la conexión con la atmósfera, interviniendo en este caso dos sistemas de flujo hídrico: el capilar, a expensas de la microporosidad edáfica y el fitovascular, que se inicia con la absorción de agua por parte de las raíces y termina con el pasaje del vapor de agua a la atmósfera, a través de las cámaras subestomáticas de los tejidos foliares y caulinares herbáceos; b) incorporación de sales contenidas en las aguas de riego y c) incorporación de sales con la fertilización.

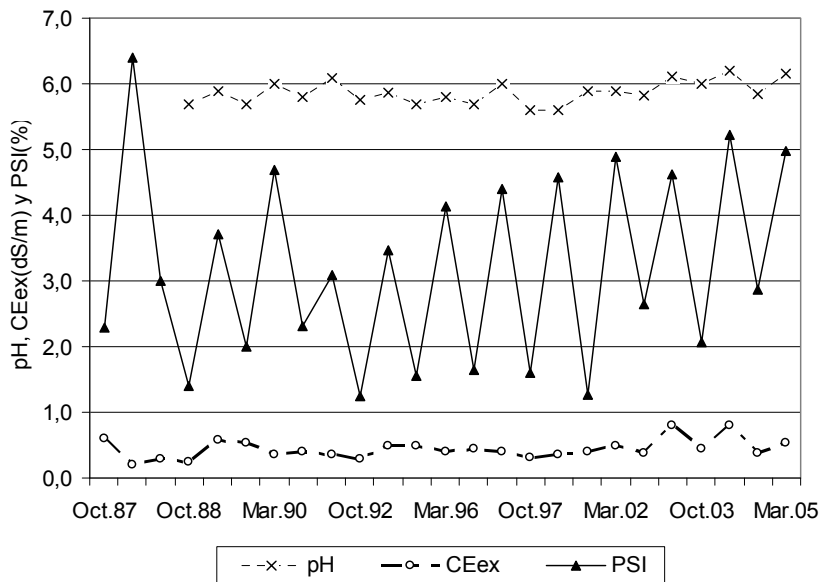


Figura 7. Evolución de los principales indicadores salinos en los suelos regados.

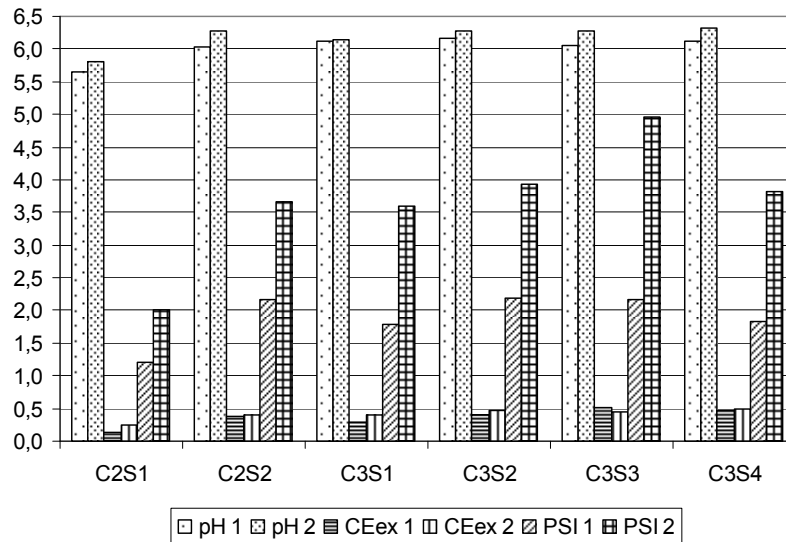


Figura 8. Indicadores de salinidad del perfil total de los suelos regados con aguas de distinta clase de aptitud, obtenidos en pretemporada (1) y en posttemporada de riego (2)

Se presentan, a modo de ejemplo (Fig. 9), los resultados de la simulación, para el Lote 2 de la Ea. Santa Ida, Huanguelén, Pcia. de Buenos Aires, una vez corrido el programa Balansal con datos correspondientes a cuatro lotes regados durante dos a cuatro campañas agrícolas, con diferentes condiciones de suelos, cantidades y oportunidades de lluvias, rotaciones de cultivos, número de riegos y láminas aplicadas, con aguas de distinta calidad (Mirábile et al. 2007, Génova 2007). La Figura 9 muestra los aportes de las lluvias y las láminas de riego y las salidas por consumo evapotranspirativo (de los cultivos y del suelo

en barbecho), que constituyen las variables de entrada del Balansal.

Uno de los resultados del Programa Balansal es el cálculo seriado de la humedad actual del suelo y de la percolación ocurrida. La Figura 10 permite observar la dependencia de la percolación con la capacidad de retención hídrica máxima del suelo, cuando es superada por la recarga.

La Figura 11 muestra las salinidades medidas a campo y simuladas por el Balansal que, como se observa en la Figura 12, se correlacionan altamente demostrando la capacidad de pronóstico del modelo de balance hidrosalino utilizado.

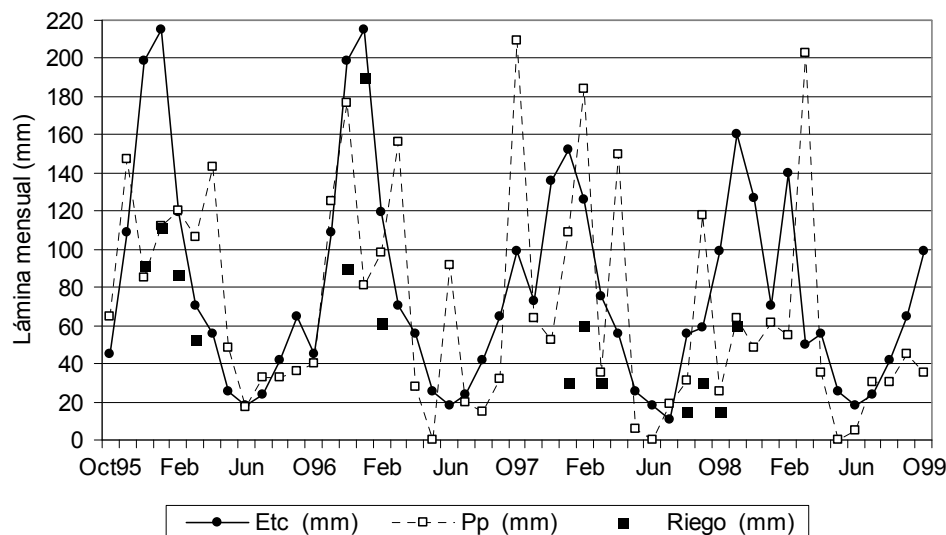


Figura 9. Evolución de la evapotranspiración, precipitación y riego. Lote 2, Estancia Santa Ida.

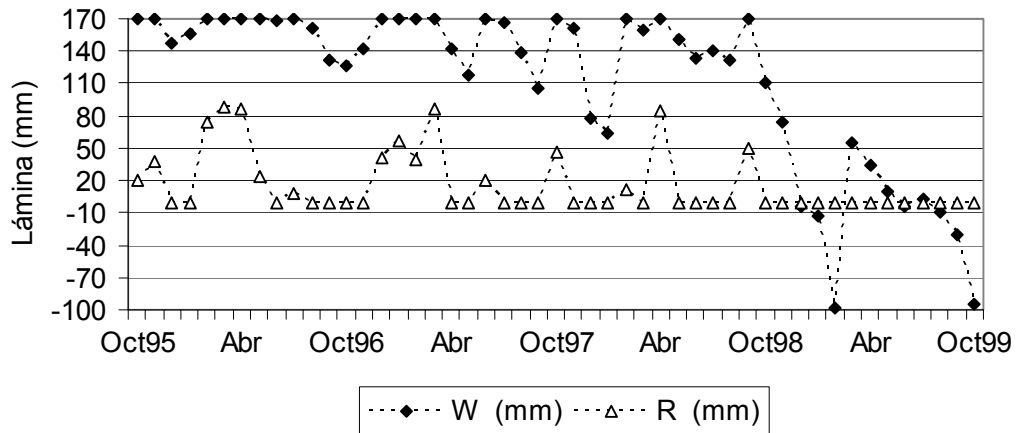


Figura 10. Humedad del suelo (W) y volumen lixiviado (R). Lote 2, Estancia Santa Ida.

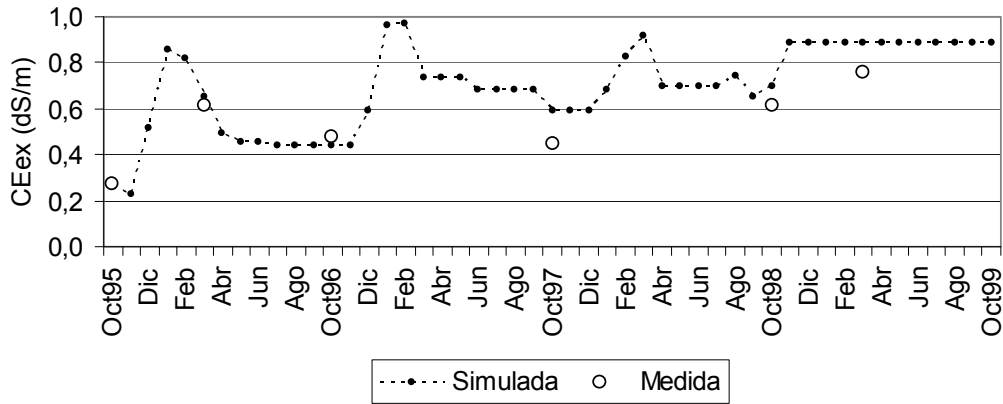


Figura 11. Evolución de la salinidad del suelo simulada y medida. Lote 2, Estancia Santa

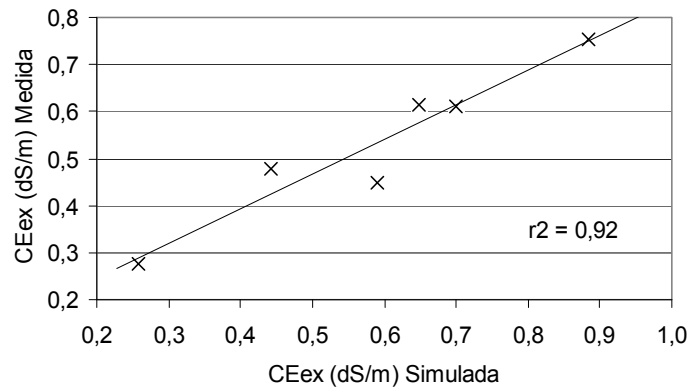


Figura 12. Grado de correlación entre los valores medidos a campo y simulados con el Modelo Balansal de la salinidad del suelo. Ea. Santa Ida, lote 2.

CONCLUSIONES

Las aguas disponibles en los acuíferos Pampeano y Puelches son mayoritariamente aptas para ser utilizadas en el riego complementario de cultivos extensivos en la región pampeana húmeda.

Las clasificaciones de calidad de agua para riego obtenidas aplicando los métodos del US Salinity Lab, FAO y Proy. IPG-INTA, establecen mayores coincidencias entre sí sobre el efecto salino que sobre el sódico, evidenciando que este último es específico para riego complementario pues, además del aspecto hidroquímico, propone la intervención de otros factores relacionados con el régimen de lluvias, las láminas regadas y las propiedades de los suelos, que permiten interpretar más integralmente la aptitud de las aguas.

En base a los resultados del estudio del impacto del agua subterránea en suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos, cultivados durante 20 años con maíz, soja y trigo bajo riego complementario (coincidentes con los de otros investigadores) y de las aplicaciones de modelos utilizados para la simulación de las dinámicas hídrica, salina y sódica, se considera que el método del US Salinity Laboratory es inapropiado para estimar el grado de sodificación de los suelos regados complementariamente, a partir de la RAS_a . Los PSI de los suelos regados, tanto los medidos como los simulados, nunca superaron el 11,6 % (con promedios en posttemporada del 5,2 %). De todos modos, se reconoce la validez del método en la zona húmeda con fines identificatorios de clases de aptitud de las aguas, dada su sencillez y uso generalizado. Sin embargo, se desestima su capacidad de pronóstico de los efectos de las sales y del sodio, debido a que no toma en cuenta las lluvias y sus consecuencias en el lavado de sales ni en el intercambio catiónico que se produce en suelos cuyas propiedades son una consecuencia de la pedogénesis en clima húmedo sin riego integral.

El método de la FAO clasifica la calidad de las aguas para riego definiendo grados de restricción al uso con mayor tolerancia respecto de la salinidad y al asociar más fuertemente la relación entre la CE_a y la RAS_a para evaluar la sodicidad, amplía los rangos de tolerancia para aguas que contengan valores altos de ambos indicadores, aunque tampoco considera las condiciones climáticas húmedas y sus efectos, en la modalidad de riego complementario.

Resulta promisorio clasificar la aptitud del agua en las condiciones reales de uso, atendiendo a los mecanismos de recuperación del suelo como el lavado y el intercambio catiónico, en los que las precipitaciones y la capacidad de intercambio del suelo juegan un rol decisivo en los equilibrios salinos y sódicos. La caracterización de la resistencia y la resiliencia de los suelos a las degradaciones salinas y sódicas garantizan la sustentabilidad de los sistemas de manejo de cultivos extensivos bajo riego complementario (Génova 2003, 2007, 2010, 2011). En sintonía con estas evidencias se considera útil la propuesta de clasificación del Proy. IPG-INTA, que requiere, para su generalización en la región pampeana húmeda, culminar con los estudios de impacto de las aguas en los suelos Vertisoles, ubicados en ambos márgenes del Río Paraná. La aplicación de este método, restringe el uso por salinidad (4,7 %) y por sodicidad (14 %) de las aguas clasificadas.

El monitoreo de la evolución de la salinidad, sodicidad y productividad de los lotes regados contribuirían, sin duda, a la sustentabilidad de los agro-ecosistemas, constituyendo una ayuda importantísima para los productores.

BIBLIOGRAFIA

- Abrego, F; A. Andriulo; C. Ferreyra; M. Galetto; J. Galina; C. Iruiria; R. Mon; F. Rimatori & C. Sasal.** 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. II. Propiedades físicas. Actas del XVI Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo, Comisión IV, pp. 249:250. Villa Carlos Paz.
- Andriulo, A. & C. Ferreira.** 1997. Impacto ambiental del riego complementario: rumbo a la ecoeficiencia. Comunic. Rev. de Tecn. Agropecuaria INTA Pergamino. Vol II (6):51-53.
- Andriulo, A; M. Galetto; C. Ferreira; G. Cordone; C. Sasal; J. Galina & F. Rimatori.** 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. I: Propiedades físico-químicas. Actas del XVI Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo, Com. IV, pp. 247:248. V. Carlos Paz.
- Andriulo, A; M. Galetto; C. Sasal; F. Abrego, M. Bueno, F. Rimatori & 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. de Ciencia del Suelo, Com. IV, N°5. Trabajo completo en CD-ROM. Mar del Plata.
- 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.
- Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina.** 2002. Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Buenos Aires.
- Auge, M. & M. Hernández.** 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 Olavarria. Vol II. Buenos Aires-París.
- Auge, M., M.A. Hernández & L. Hernández.** 2002. Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la Pcia. de Buenos Aires, Argentina. En Aguas subterráneas y Desarrollo Humano. XXXII IAH y VI ALHSUD. Ed. CD ROM. Mar del Plata.
- Auge, M.** 2004. Regiones hidrogeológicas de la República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea. En <http://www.alhsud.com/public/ebooks/reghidroarg.pdf>. Último acceso: noviembre de 2011.
- Ayers, R. & D. Westcot.** 1987. La calidad del agua en la agricultura. Serie FAO Riego y Drenaje N° 29 rev.1. Roma, Italia.
- Bernardo, S.** 1995. Manual de Irrigação. Ed. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.
- Boivin, P.** 1998. Riego Suplementario en Santa Fe: Clasificación química del agua subterránea. La Revista del Riego, Bs. As. 26-27 pp.

- Carricaburu, J.** 1998. Calidad de agua para riego. Aguas subterráneas uruguayas. Actas del 4to. Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. pp. 1107-1113.
- Castiglioni, M. & J. Cejas.** 1996. Análisis de factores naturales para riego complementario de la zona Centro de Santa Fe. Ministerio de Agricultura de Santa Fe.
- Caviglia, O. & O. Papparotti.** 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 Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Comisión IV, N° 15. Trabajo completo en CD-ROM. Mar del Plata.
- Caviglia, O., P. Barbagelata & O. Papparotti.** 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 Cong. Arg. de Ciencia del Suelo, Com. IV, N° 17. Trabajo completo en CD-ROM. Mar del Plata.
- Caviglia, O & J.L. Costa.** 2002. Cambios en propiedades químicas de suelos regados: evaluación del modelo LEACHC. Resúmenes del XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Comisión IV. Puerto Madryn, Chubut. 16-19 de abril de 2002. p. 78.
- Ceci, J.H.** 1969. El agua subterránea del NE de Buenos Aires. CIC. La Plata.
- Cerana, J.** 1980. Deterioro de los suelos a consecuencia de riegos con aguas poco salinas que contienen bicarbonatos. Actas 6ta Reunión A.A.C.S. Paraná. Tomo I: 55-61.
- Costa, J., B. Lyle Prunty, J. Richardson & R. Alessi.** 1991. Water quality effects on soils and alfalfa: II Soil Physical and Chemical Properties. Soil Sci. Soc. Am. Journal. 55:203-209.
- Costa, J.L.** 1995. Manual de riego del productor pampeano. SAGPyA. 64 pp.
- Costa, J.L.** 1998. Calidad de agua para riego. Cuaderno. AgroMercado N° 28, 8-11
- Costa, J.L.** 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. Water Use in Crop Production pp 85-99.
- Fassbender, H. & E. Bornemisza.** 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2° Ed. rev., San José, Costa Rica. Colecc. Educativos/IICA; n° 81.
- Génova, 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.
- Génova, 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.
- Génova, 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. RLAC-FAO y el PRONADRET. 24 y 29 de octubre de 1989. Chiclayo, Perú.
- Génova, L.** 1991. El riego complementario de maíz en el sudeste bonaerense. Actas de las 3ras. Jornadas de Actualización Profesional sobre el cultivo del maíz. Fac. de Cs. Agrarias de la U.N. de Mar del Plata y la EEA INTA Balcarce. Mar del Plata.
- Génova, 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 Cong. Nac. de Maíz '92 y II Reunión Suramericana. Cap. II. pp. 86:89. Pergamino.
- Génova, 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 Congr. Arg. Ciencia del suelo. 347:348 pp. Mendoza.
- Génova, L.** 1994. Riego complementario de maíz, soja y trigo en el norte de Buenos Aires: efectos de la salinidad de las aguas subterráneas en los suelos y su influencia en los rendimientos. Actas del Primer Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola. Univ. de Concepción, Chillán, Chile.
- Génova, L.** 1995. Riego complementario de cultivos extensivos en la región pampeana húmeda. Ea. Santa Emilia, Elortondo, Santa Fe. CREA-Región Sur de Sta Fe.
- Génova, L.** 1996. Efecto de aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas en suelos pampeanos Argiudoles típicos de las Provincias de Buenos Aires y Santa Fe, regados complementariamente por aspersión con equipos de pivote central. Inédito.
- Génova, L., J. E. Marassi, M. Etcheverry & W. Chale.** 1998. Optimización de la operación de riego complementario de cultivos extensivos en el Norte de Buenos Aires. En Avances en el manejo del suelo y agua en la Ingeniería Rural Latinoamericana. Topografía, aguas y suelos. ISBN N° 950-34-0124-0. Balbuena, Benez y Jorajuría editores. Cong. Latinoam. de Ingeniería Rural CLIR '98. La Plata.
- Génova, L.** 2002. Resistencia y resiliencia de seis Argiudoles pampeanos a las degradaciones salina y sódica, regados complementariamente con agua subterránea. Resúmenes del XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Comisión IV Manejo y conservación de suelos y aguas, riego y drenaje, pág. 88. Completo en CD-Rom. Puerto Madryn, 16 al 19 de abril de 2002.
- Génova, L.** 2003. Resistencia y resiliencia de suelos pampeanos a la degradación salina y sódica, disturbados por riego complementario. Revista de la Facultad de Agronomía. 23 (2-3) 119:130. Buenos Aires.
- Génova, L.** 2004. Salinidad y sodicidad edáfica de agroecosistemas regados complementariamente en el centro y sur de la Provincia de Buenos Aires. Resúmenes del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Comisión 4, pp. 343. Trabajo completo en CD-ROM. Paraná, 22 al 25 de junio de 2004. pp. 6.
- Génova, L.** 2005 a. Resistencia y resiliencia edáfica a la degradación salina y sódica en agroecosistemas regados complementariamente en la Pampa Húmeda Argentina Resúmenes del II Congreso Internacional de Riego y Drenaje, pág 41. Trabajo completo en CD-ROM. La Habana, Cuba. 25 al 29 de octubre de 2005.
- Génova, L.** 2005 b. Sostenibilidad de agroecosistemas pampeanos regados complementariamente. En

- Avances en Ingeniería Agrícola 2003-2005, Barbosa, O. Ed. Capítulo Manejo de aguas y suelos, pp. 213-218. Villa Mercedes, San Luis.
- Génova, L.** 2007. Resiliencia a la degradación salina y sódica de algunos suelos pampeanos, regados complementariamente con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata. 195 pp. y anexo.
- Génova, L.** 2009. Sustentabilidad de agroecosistemas pampeanos bajo riego complementario. Revisión de 20 años. Avances en Ingeniería Rural 2007-2009. Capítulo 2. Suelos, agua y medio ambiente, 579-586 pp. Editores responsables N. Di Leo, S. Montico y G. Nardón. CD Rom ISBN 978-950-673-752-8. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Génova, L.** 2010. Sustentabilidad de agroecosistemas pampeanos argentinos regados complementariamente. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura. Tomo II. Capítulo Agrohidrología. 605-612 pp. Editores M. Varni, I. Entraigas y L. Vives. Azul, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-543-392-2.
- Génova, L.** 2011. Sustentabilidad del riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. Resiliencia a la degradación de suelos regados complementariamente con aguas salinas. Ed. Académica Española. ISBN 978-3-8443-3855-3. pp 256. www.eae-publishing.com
- Ghiberto, P., R. Marano, M. Pilatti & O. Felli.** 2002. Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Molisoles de Santa Fe. 2) Estudio de caso: degradación física de un Argiudol en el Centro Este santafesino. Resúmenes del XVIII Cong. Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut. 16-19 de abril de 2002. p. 89
- González, N. & M. Hernández.** 1997. La práctica del riego y el desarrollo sustentable en los acuíferos del Noroeste bonaerense. Congreso Nacional sobre Aguas. UBA-AUGM-UNESCO, I:55. Buenos Aires.
- González, N.** 2004. Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. CISAUA-UNLP. La Plata. 20 pp.
- Grenón, D.** 1988. Modificaciones producidas por el riego complementario en un suelo Argiudol de Pergamino, Bs As. Convenio IICA-SAGyP. 18 pp.
- Hernández, M; M. Fili; M. Auge & J. Ceci.** 1975. Geohidrología de los acuíferos profundos de la Provincia de Buenos Aires. VI Congreso Geológico Argentino. Actas II pp 479-500. Buenos Aires.
- Hernández, M.** 2005. Panorama ambiental de los recursos hídricos subterráneos en la Pcia. de Buenos Aires. Relatorio del XV Congreso Geológico Argentino La Plata.
- Irurtia, C.** 1995. Efecto del riego complementario en las propiedades físicas del suelo. 2do. Seminario de Actualización Técnica en Riego. Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica-Centro Argentino de Ingenieros Agrónomos-Sociedad Rural Argentina-INTA. pp. 41-66. Bs. Aires.
- Irurtia, C. & 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. pp. 241-242.
- Lavado, R.** 1976. Salinización y alcalinización de suelos pampeanos bajo riego complementario. Rev. de Investigaciones Agrícolas INTA XIII (2):41-57.
- Losinno, B; C. Sainato & L. Giuffrè.** 2004. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo en la zona de Pergamino-Arrecifes. Riesgos de salinización y sodificación por aplicación de riego complementario. Resúmenes del XIX Congr. Argentino de Ciencia del Suelo, Comisión 4. Trabajo completo en CD-ROM. Paraná, 22-25 de junio de 2004. 6 pp
- Maas, E. & G. Hoffman.** 1977. Crop salt tolerance, current assessment. J. Irrig. Drain. Div. ASCE 103, 115-134. New York.
- Maas, E.** 1990. Crop salt tolerance. In: K.K. Tanji (Ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Am. Soc. Civil Engineers, New York. USA. pp. 262-304.
- Marano, R; M. Pilatti & J. de Orellana.** 2000. Efectos físico-químicos de aguas bicarbonatadas sódicas sobre Argiudoles del Centro Este Santafesino. Actas del XVII Cong. Arg. Ciencia del Suelo. Com. IV. N° 41. Trab. completo en CD-ROM. Mar del Plata.
- Marano, R; M. Pilatti & O. Felli.** 2000. Riego suplementario en el Centro Este Santafesino. Efecto de cambios edáficos luego de cuatro años de riego, sobre la producción de maíz. Actas del XVII Cong. Arg. Ciencia del Suelo. Com. IV. N° 42. Trabajo completo en CD-ROM. Mar del Plata.
- 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. Facultad de Ciencias Agrarias. Univ. Nac. de Cuyo. Mendoza.
- Marano, R.** 2004. Propuesta de un nuevo indicador de peligrosidad de aguas bicarbonatadas sódicas en suelos bajo riego complementario. Resúmenes XIX Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo, Com.4. Trabajo completo en CD-ROM. Paraná. 6 pp
- Mirábile, C. & L. Fornero.** 1987. Modelo de Simulación de Balance Salino de un Distrito de Riego. INCYTH-CRA. Mendoza. Publicado en Mecanismos de Aprovechamiento Hídrico de la Región Andina, editor Massimo Menenti.
- Mirábile, C; L. Génova & J. Monteleone.** 2007. Validación del modelo Balansal en suelos con riego complementario en la Pampa Húmeda. Comisión Riego y Drenaje. Congreso Nacional del Agua 2007. Tucumán, 15 al 18 de mayo de 2007. 16 pp.
- Peinemann, N; M. Díaz Zorita; M. Villamil; H. Lusarreta & D. Grunewald.** 1998. Consecuencias del riego complementario sobre las propiedades edáficas en la Llanura Pampeana. Ciencia del Suelo 16:39-42.
- Pilatti, M; R. Marano & J. de Orellana.** 2002. Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Molisoles de Santa Fe. 1) Sodificación y alcalinización. Resúmenes del XVIII Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn. 16 al 19 de abril de 2002. pp. 98.
- Programa de métodos analíticos de referencia.** 1995. Comité de Química de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires.
- PROSAP.** 1995. Programa de servicios agrarios provinciales. Riego complementario. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Bs. Aires.

PROSAP. 2006. Programa de servicios agrarios provinciales. Servir al agro. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Ministerio de Economía y Producción de la R. Argentina. Bs. Aires. 180 pp.

Proyecto IPG-INTA. 1998. Síntesis de discusión del taller sobre calidad de aguas para riego. Proy. IPG. Noviembre 9-10 de 1998. Pergamino. 3 pp.

Richards, L . (Editor). 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los EE. UU. de América, Riverside, California. Washington. 172 pp.

Rhoades, J; A. Kandiah & A. Mashali. 1992. El uso de agua salina para la producción de los cultivos. Publicación FAO N° 48, Serie de Riego y Drenaje. Roma.

SAGyP-INTA-IICA. 1988. Proyecto de Cooperación para la Modernización del Sector Agropecuario. Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera del riego complementario y Uso de Aguas Subterráneas en la región maicera típica. 33 pp.

Sala, J.M. 1975. Recursos hídricos (especial mención de las aguas subterráneas). En Relatorio Geológico de la Pcia. de Bs. Aires. VI Cong. Geológico Argentino. Bahía Blanca.

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. Ferreira; F. Abrego; M. Bueno; F. Rimatore & 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 Cong. Arg. de Ciencia del Suelo, Com. IV, N° 54. Mar del Plata.

Secretaría de Recursos Naturales & Desarrollo Sustentable. 2000. Metodología para el establecimiento de niveles de guía de calidad de agua para riego. Inédito.

Svartz, H. 1993. Simulación de cambios en las propiedades físicas y fisico-químicas en columnas de suelo de Pergamino bajo condiciones de riego complementario. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, UBA. 65 pp.

Vázquez, M; G. Millán & P. Gelati. 2004. Salinidad y sodicidad de un suelo con riego complementario en el centro-E de la Provincia de Buenos Aires. Resúmenes del XIX Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo. Com. IV. Paraná. 22-25 de junio de 2004. p. 255.

Vázquez, M.; G. Millán & P. Gelati. 2006. NO y Centro-E de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía. 57-67, 2006.

Wyckers, A. & L. Génova. 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. Buenos Aires. 45 pp.