

PROPIEDADES EDÁFICAS Y DEL AGUA SUBTERRÁNEA. RIESGOS DE SALINIZACIÓN Y SODIFICACIÓN DE LOS SUELOS, EN LA ZONA DE PERGAMINO-ARRECIFES

BEATRIZ N. LOSINNO; CLAUDIA M. SAINATO y LIDIA GIUFFRÉ

Facultad de Agronomía, UBA. Av. San Martín 4453 (1417DSQ). Buenos Aires. Argentina. TE: 45248099
e.m.: bnlosinno@fibertel.com.ar

Recibido: 08/02/05

Aceptado: 01/08/05

RESUMEN

La utilización del agua subterránea para riego complementario, puede producir salinización y/o sodificación de suelos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar los riesgos de salinización y sodificación del suelo por la aplicación de riego complementario, investigando la distribución de la conductividad eléctrica de los acuíferos, del nivel freático y de las propiedades físico-químicas del suelo.

Se evaluaron las características de los acuíferos obtenidas de estudios previos y se efectuó un muestreo de suelos analizando la variabilidad y distribución espacial de sus propiedades físico-químicas, mediante métodos geoestadísticos.

La conductividad eléctrica del agua freática (CE_f) presentó valores mayores que los niveles más profundos del acuífero Pampeano con una dirección de flujo NO-SE. Los estratos subyacentes presentan una tendencia de disminución de su conductividad de oeste a este.

En cuanto a las propiedades del suelo K, pH, PSI, Mg, Na y conductividad eléctrica CE_s, presentaron correlación espacial, mientras que P, C, CIC, Ca indicaron alta variabilidad para la escala de muestreo realizada. Se detectó cierto deterioro en los suelos debido a la disminución en la dotación de algunos nutrientes.

La topografía representa una gran parte de la variabilidad de la CE_s, no existiendo influencia clara de la CE_f y su profundidad sobre aquella. La zona agrícola económicamente productiva no presenta riesgos severos de salinización y/o sodificación por aplicación de riego complementario.

Palabras clave. Acuífero, suelos, conductividad eléctrica, riego.

EDAPHIC AND GROUNDWATER PROPERTIES. RISKS OF SALINIZATION AND SODIFICATION OF SOILS AT THE PERGAMINO-ARRECIFES ZONE

ABSTRACT

The use of groundwater for complementary irrigation may produce salinization and/or sodification of soils.

The objective of the research was to evaluate soil salinization and sodification risks by complementary irrigation on the basis of the study of groundwater mineralization, depth of aquifers and physicochemical properties of soils.

The aquifer properties obtained from previous geophysical studies were evaluated and a soil sampling was performed analysing the variability and spatial distribution of their physicochemical properties, by means of geostatistical methods. The electrical conductivity of free groundwater (EC_f) showed greater values than the deeper levels of the Pampeano aquifer with a direction of groundwater flow NE-SE. This aquifer presented a trend of decrease of their conductivity from west to east.

Soil properties such as content of K, Mg, Na, pH, ESP (exchangeable sodium percentage) and electrical conductivity EC_s, showed spatial correlation, while P (extractable phosphorus), C (organic carbon), CEC (cation exchange capacity), Ca (calcium) indicated high variability for the sampling scale used. Some deterioration on soils was detected due to the decrease in concentration of K in all the soil series at the study zone, and in a lesser scale the content of Ca and Mg.

Topography represented a great part of the EC_s variability, lacking any clear influence of the EC_f and the depth of water table. The economically productive agricultural zone did not show any severe risk of salinization and sodification of soils by the application of complementary irrigation.

Key words. Aquifers, soils, electrical conductivity, irrigation.

INTRODUCCIÓN

El estudio en conjunto del suelo-agua subterránea permite garantizar un uso sustentable de dichos recursos naturales. Conocer su potencialidad y limitaciones para el uso agrícola, tenderá a preservar dichos recursos para las próximas generaciones. En particular, la explo-

tación de los recursos hídricos subterráneos, en vista de su utilización para riego, requiere de la implementación de estudios previos, no sólo relacionados con los acuíferos sino también con los suelos a fin de evitar un impacto ambiental negativo. Por lo tanto, a los riesgos de contaminación de los acuíferos debido a una mala ges-

ción del recurso se le suma el problema de la salinización y/o sodificación de los suelos que se puede presentar por el uso de agua de baja calidad para riego (Peinemann *et al.*, 1998). El estudio de la distribución de las propiedades del suelo y del agua puede contribuir como información de base para proyectos agropecuarios que involucren el uso de estos recursos naturales.

En la zona de estudio, sobre el basamento hidrogeológico impermeable, se encuentra la Formación conocida como "Mioceno Rojo", de origen continental, seguida de la Formación "Mioceno Verde", de origen marino, que contiene acuíferos de elevada salinidad, carentes de interés económico de explotación. Por encima de esta secuencia se encuentra la Formación Puelche, que aloja al acuífero del mismo nombre, que puede contener agua con bajo contenido en sales (zona de Arrecifes) o salina (Pergamino). Estas subyacen a los sedimentos Pampeanos, que contienen un acuífero multicapa con niveles permeables e impermeables intercalados y donde existe conexión entre estos niveles y el acuífero freático (Santa Cruz y Silva Busso, 1995). Estos acuíferos, que poseen agua bicarbonatada sódica, son los que se explotan para riego complementario, es decir se aplican láminas de agua en un breve lapso que coincide con el de mayor demanda de agua por parte de los cultivos que no puede ser satisfecha por las lluvias, ni por el agua almacenada en el perfil del suelo.

Sainato *et al.* (2003) han estudiado las características de los acuíferos en esta zona, estableciendo que al oeste de Pergamino, la interfase agua dulce-agua salada se encontró a 28 m de profundidad, sobre la margen derecha del arroyo Pergamino y a 60 m a la izquierda profundizándose hacia el NO y hacia el SE. El acuífero libre se ubica entre 1 y 8 m de profundidad.

En la zona de Pergamino, Génova (1992) no encontró cambios fundamentales en el PSI y conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación del suelo tras 8 años de aplicación de riego complementario. Andriulo *et al.*, (1998) determinaron a lo largo de 11 años un notable aumento de estas propiedades. Asimismo, Losinno *et al.* (2002) han delimitado algunas zonas riesgosas en cuanto a la salinización y sodificación del suelo, por aplicación de dicha técnica.

Es de suma importancia tener en cuenta el fenómeno de ascenso del nivel freático, ya que bajo ciertas condiciones climáticas la evaporación directa del agua origina concentración de sales produciendo la salinización del suelo. Por otro lado, dicho ascenso capilar puede favorecer el aporte hídrico a la zona radicular si se encuentra a poca profundidad, o favorecer la aireación si es más profunda. Pepi *et al.* (1998) en el NO de la provincia de Buenos Aires, obtuvieron mayor conductividad eléctrica

del acuífero freático (CE_f) y del suelo (CEs) en las zonas deprimidas (con mayor contenido de partículas finas). Por lo cual, se supuso que existe un patrón similar entre la distribución de la conductividad eléctrica del suelo (CEs) y del acuífero freático (CE_f), y que la profundidad de éste influye sobre la CEs. Por lo tanto, uno de los objetivos fue investigar la distribución espacial de estas propiedades y evaluar la influencia de la profundidad y conductividad del acuífero freático sobre la CEs.

Suponiendo que las propiedades del suelo presentan correlación espacial se planteó además investigar la distribución de las propiedades físico-químicas en la zona de estudio.

En general, las clasificaciones del agua en cuanto a su aptitud para riego, se basan sólo en las propiedades del agua utilizada. Es importante tener en cuenta el tipo y estado actual del suelo y las condiciones climáticas de la zona para optimizar su aplicación. Se propuso entonces, como último objetivo, una calificación involucrando el suelo y el agua, es decir utilizando normativas adaptadas a las condiciones edafoclimáticas de la zona y teniendo en cuenta, además, la CE y el PSI del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio está ubicada en la llanura Pampeana (Figura 1), en la subregión ondulada. El clima es templado con una temperatura media de 16 °C, sometido a cambios repentinos debido a su condición de planicie abierta. La media anual de precipitaciones es de 970 mm aproximadamente, reconociéndose períodos húmedos de 5 y 15 años y secos de 10 años (Sainato *et al.*, 1997)

Los suelos corresponden principalmente a Argiudoles típicos, predominando las Series Pergamino, Rojas, Las Gammas, Juncal, El Arbolito, Arroyo Dulce y el complejo del Arroyo Sin Nombre (INTA, 1972). Por otra parte, en el área de influencia de bañados y arroyos, los suelos, Natracuoles típicos, se desarrollaron a partir de aluviones, con una fuerte influencia de condiciones hidrohalmórficas. El uso de la tierra es principalmente agrícola con predominio de producción de soja y maíz y en menor proporción la cobertura es de pasturas implantadas.

Estudio del agua subterránea

Se utilizaron los resultados obtenidos de una campaña previa donde se realizaron 35 sondeos eléctricos verticales (SEV) a una distancia promedio de 3 km (Sainato *et al.*, 2003), para el estudio de las características de los acuíferos, que coinciden con 17 sitios de muestreo de suelo (Figura 1) y 10 sitios donde se cuenta con datos químicos del agua subterránea (Galindo *et al.*, 2002), todos geo-referenciados.

Los SEV consisten en medir la diferencia de potencial eléctrico que causa una corriente eléctrica introducida en la tierra, permitiendo estudiar los cambios en la resistividad del subsuelo debido al tipo de sedimentos y la salinidad del agua presente. Se midieron valores de resistividad aparente experimental, obtenidos

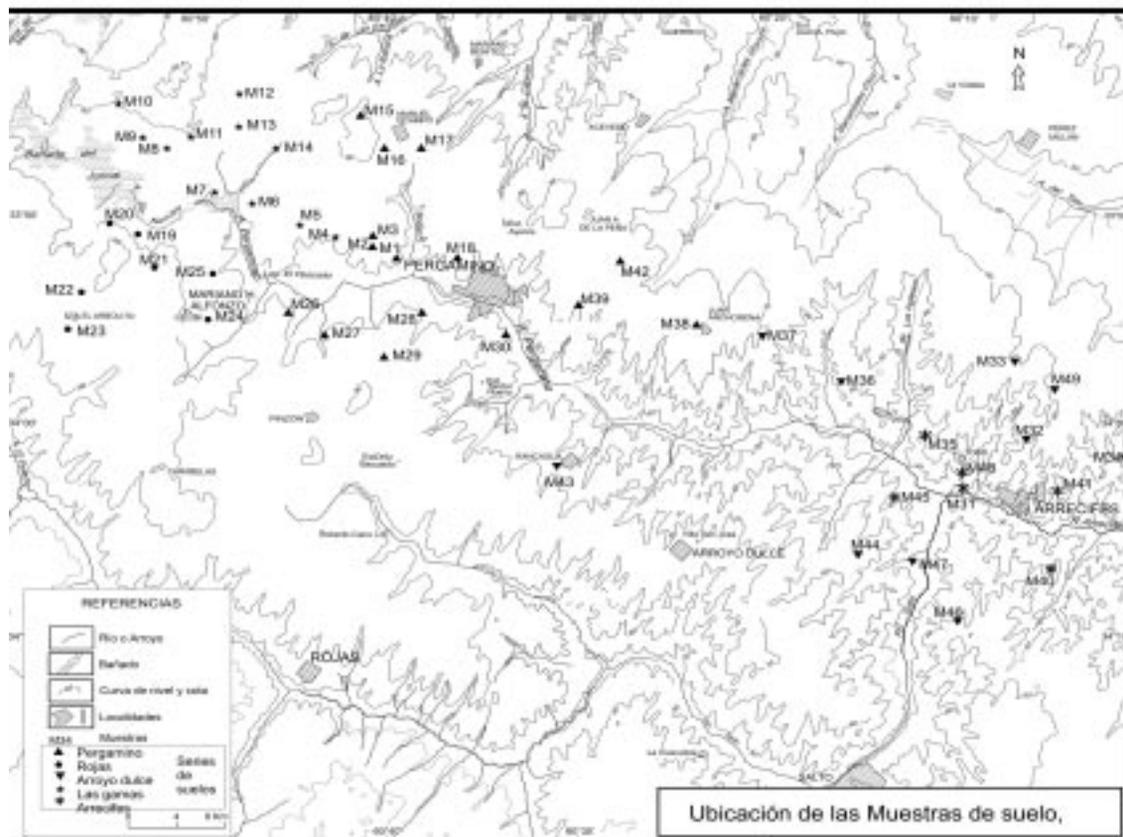


Figura 1. Zona de estudio, indicando los sitios de muestreo de suelos según la serie a la que pertenecen.

Figure 1. Study zone, showing sites of soil sampling according to soil series.

niéndose por el proceso matemático de inversión, los modelos de capas de la resistividad real de los estratos saturados que se cotejaron con la información litológica disponible. Se obtuvieron: CE_p , nivel freático expresado como altura en m (s.n.m.) y resistividad eléctrica (inversa de la conductividad) del acuífero Pampeano, en cada sitio de sondeo, cubriendo la zona de estudio presentada en la Figura 1.

Muestreo y análisis de suelos

Se llevó a cabo un muestreo direccionado en función de la proximidad a los sitios en donde se investigó las características del agua subterránea (Figura 1). Se obtuvieron 49 muestras compuestas de tres submuestras a una profundidad de 0 a 10 cm. Las muestras fueron secadas al aire, molidas en mortero y tamizadas por tamices de 0,5 y 2 mm para realizar los análisis físico-químicos.

Las determinaciones realizadas en el Laboratorio de Suelos de la FAUBA fueron: pH en agua relación 1:2.5, carbono orgánico (Walkley-Black), P extractable (Kurtz y Bray), CE_s (conductimetría en pasta), cationes intercambiables por el método del acetato de amonio IN pH 7 y capacidad de intercambio catiónico (CIC), calculándose además el PSI (porcentaje de sodio intercambiable) (Page *et al.*, 1982). En primera instancia se realizó un análisis estadístico clásico de los datos.

Análisis geoestadístico de los datos

La metodología geoestadística, provee un método para obtener la distribución espacial de las propiedades. Existen muchos antecedentes de su aplicación, tanto en estudios sobre acuíferos como en propiedades del suelo (Warrick y Nielsen, 1981; Or y Hanks, 1992).

En este estudio se analizó la estructura espacial y distribución de las propiedades físicas del agua subterránea y físico-químicas de los suelos utilizando esta metodología.

Dado un conjunto de valores $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ de una propiedad del suelo en posiciones x_1, \dots, x_n , se estima la semivarianza $\gamma(h)$ como (Webster, 1985):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_i [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad \text{con } i=1 \text{ hasta } n(h) \quad (1)$$

donde $n(h)$ es el número de pares separados por una distancia h .

El semivariograma (gráfico $\gamma(h)$ vs h), en general, aumenta con pequeños *lag*, alcanzando un valor máximo asintótico, conocido como umbral (*sill*), que representa la varianza de la variable. El valor de *lag* al cual se alcanza dicho umbral se llama rango r y representa la distancia dentro de la cual la variable está correlacionada espacialmente (r es la distancia óptima de muestreo que dependerá de la escala de observación).

El valor de $\gamma(h)$ cuando $h \Rightarrow 0$ se llama varianza de *Nugget* y representa una medida del error experimental de la medición o micro variabilidad de la propiedad dentro de la muestra que no ha sido detectada en la escala de muestreo. Cuando el umbral U (varianza total) es igual a la varianza de *Nugget* N , las variables se consideran espacialmente independientes y aleatorias (efecto de *Nugget* puro), indicando una total ausencia de correlación espacial dentro de la escala de muestreo. Los valores de los parámetros para cada propiedad se pueden estimar por ajuste de los datos experimentales con funciones exponenciales o esféricas.

A fin de predecir el valor de una propiedad en un lugar que no fue muestreado y hacer un mapa de curvas de isóneas de la misma se utilizó la interpolación conocida como *kriging*. El rango r está asociado con la distancia máxima significativa para dicha interpolación. En este proceso, el valor de cada punto de la grilla es estimado como una combinación lineal de datos en puntos vecinos.

En la zona de estudio no se cuenta con un gran número de perforaciones para muestreo de agua, por lo cual se utilizaron los resultados de los sondeos geofísicos para una estimación preliminar de la distribución de la salinidad y la profundidad del agua subterránea a través de la geoestadística. Si bien el número de datos experimentales, no es el ideal para un tratamiento estadístico, los resultados pueden contribuir a una información de base para estudios posteriores en menor escala en la región.

Se determinaron los semivariogramas y distribuciones espaciales por *kriging* con el programa GEO-EAS (1988), para el nivel (s.n.m.) y conductividad del acuífero freático, resistividad de los niveles profundos del acuífero Pampeano y para las propiedades de los suelos muestreados. Para evaluar la relación entre la conductividad eléctrica del suelo y las propiedades del acuífero freático, se efectuaron correlaciones de la CE_s, con la CE y profundidad del acuífero freático. Para poner a prueba la hipótesis de que también la topografía puede influir sobre la CE se procedió a realizar una correlación múltiple incluyendo esta variable (STATISTIX, 1996).

Determinación de situaciones de riesgo

Se realizó una clasificación de los distintos sitios de la zona según su riesgo potencial de aplicación de riego complementario, analizando no sólo las cualidades del agua sino también la CE y PSI del suelo.

Para evaluar la aptitud del agua con respecto a su utilización para riego, teniendo en cuenta las condiciones locales de la Pampa Húmeda donde el riego es complementario, se utilizaron las recomendaciones del INTA (1999), que se ajustan más a las condiciones edafo-climáticas de la zona que otras comúnmente adoptadas. Entonces, se consideraron las condiciones para esta zona, para suelos Argiudoles, con contenido de materia orgánica de 2,5 a 3 %, de arcilla del 22 al 24%, en el horizonte A y para una lámina de riego promedio de 150 a 200 mm por año.

Para evaluar el riesgo de salinización, se tuvo en cuenta la CE de cada sitio y la CE de la muestra de agua del acuífero Pampeano del pozo más cercano en explotación (CE_p) (Galindo *et al.*, 2002).

Para determinar sitios con distinto grado de riesgo de sodificación, se analizó la relación de adsorción de sodio (RAS) del agua de las perforaciones y el PSI del suelo. El RAS calculado como:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{(Ca + Mg)}/2}$$

representa una medida del peligro potencial de sodificación del suelo. El PSI se calcula como el cociente entre el sodio de intercambio y la CIC.

RESULTADOS

Agua subterránea

Se analizaron dos propiedades del acuífero freático: nivel (s.n.m.) y conductividad eléctrica (CE_f). La Figura 2a muestra el semivariograma para nivel freático, siendo el rango obtenido de 20 km, y la relación N/U muy pequeña, o sea una fuerte dependencia espacial de la variable, según Cambardella *et al.* (1994).

La Figura 2b muestra la distribución espacial del nivel freático obtenida por *kriging*, donde se puede observar una clara disminución del mismo hacia el SE, acompañando la topografía, con valores máximos de 82 metros en el norte y oeste del área de estudio hasta 32 m en la ciudad de Arrecifes.

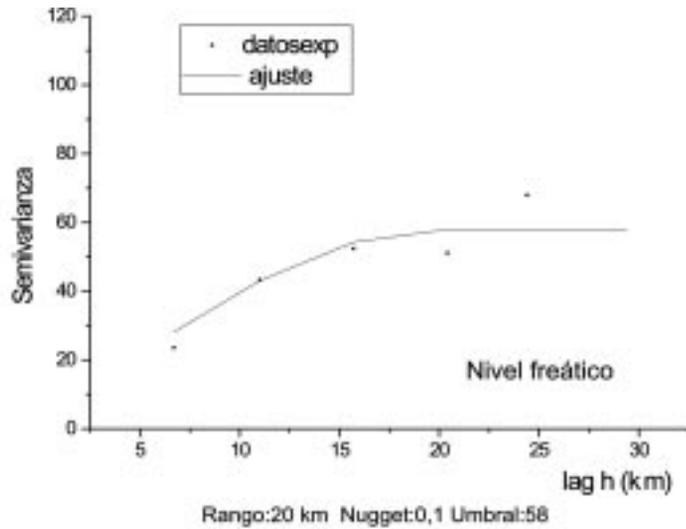
El ajuste por medio de una función exponencial, obtenido para el semivariograma de la CE_f no fue óptimo (Figura 3a) y su distribución espacial presenta una zona con mayor gradiente (Figura 3b), al NO, con la presencia de un máximo.

El semivariograma de la resistividad propia del acuífero Pampeano (obtenida de los modelos de los SEV, a profundidades promedio de 25 m) ajustado con una función esférica se presenta en la Figura 4a; su correlación espacial es moderada (N/U es del 33%) hasta los 20 km. Sus curvas de distribución muestran una clara tendencia, desde valores cercanos a 8 ohm m (conductividad de 1,22 dS/m) al oeste del área incrementándose hacia el este hasta 18 ohm m (conductividad de 0,55 dS/m) como se puede ver en la Figura 4b.

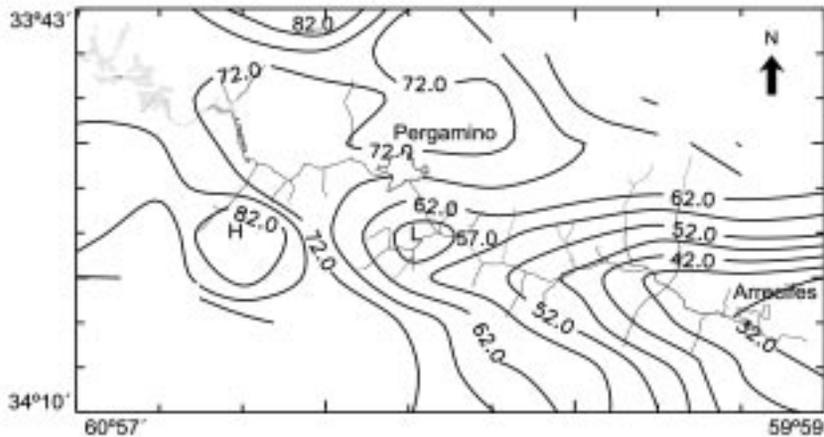
Análisis de suelos

Del análisis de las propiedades del suelo realizado sobre las 49 muestras, mediante estadística clásica, se obtuvieron resultados típicos de la zona (Tabla 1), excepto en los bañados del Juncal donde se presentaron algunas anomalías. Se calcularon los valores medios de dichas propiedades, sectorizando según las principales series a las que pertenecen estos suelos, y se compararon con los valores de las cartas correspondientes (INTA, 1972), evaluándose en qué porcentaje variaron las mismas (Tabla 2).

Mediante un análisis geoestadístico se construyeron los semivariogramas del contenido de Na, K, Mg, CE, pH, y PSI, los cuales presentaron correlación espacial con rangos que variaron entre 11 y 42 km. No hubo correlación (efecto de *Nugget* puro) para el contenido de Ca, C, P y CIC. La Figura 5 muestra la distribución espacial de las propiedades que resultaron correlacionadas espacialmente.



a)



b)

Figura 2. a) Semivariograma del nivel freático obtenido de los datos experimentales, el modelo de ajuste exponencial y sus parámetros. Semivarianza expresada en m^2 . b) Distribución del nivel freático, en metros sobre el nivel del mar, obtenida del proceso de Kriging. L: mínimo, H: máximo.

Figure 2. a) Semivariogram of water table obtained from experimental data, the exponential fitting model and its parameters. Semivariance expressed in m^2 . b) Distribution of water table, in meters above sea level, obtained from process of kriging. L: minimum, H: maximum.

La distribución del pH evidencia dos máximos, uno cerca de la ciudad de Pergamino y el otro al SE en la margen derecha. El mínimo se ubica en la zona de los Baños del Juncal, donde el Mg presenta un máximo.

En el mapa de isolíneas del contenido de K se puede observar una distribución bastante homogénea con un mínimo en la zona de Arrecifes y un máximo hacia el oeste, ambos sobre la margen derecha del arroyo.

De la distribución del PSI se puede observar un máximo en las cercanías de Arrecifes, disminuyendo hacia el NO, para volver a incrementarse hacia la zona de bañados.

Del análisis del mapa de la distribución del contenido de Na, obtenida por *kriging* se observó un aumento en sentido SE, con un máximo y tres sitios que presentan mínimos, en ambas márgenes del Arroyo Pergamino.

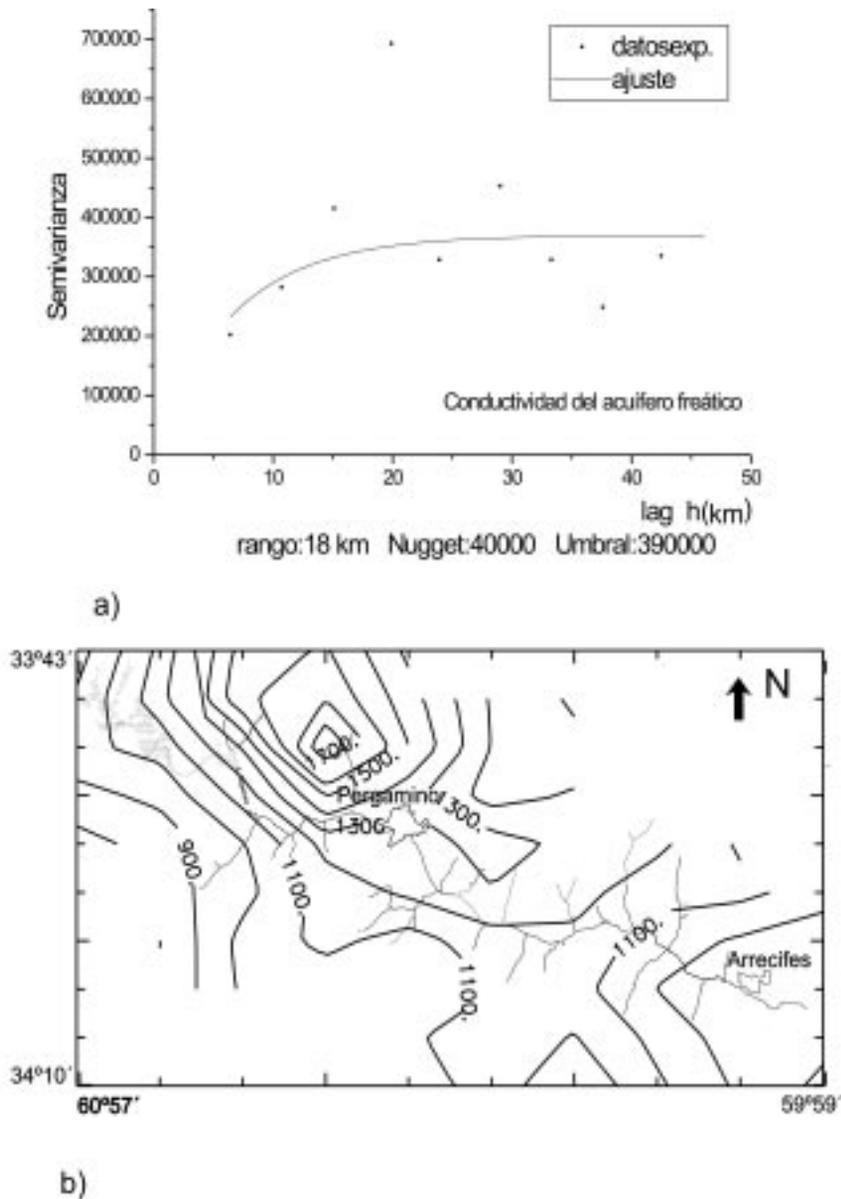


Figura 3. a) Semivariograma de la CE del acuífero freático, obtenido de los SEV, el modelo de ajuste exponencial y sus parámetros. Semivarianza expresada en $(10^{-3} \text{ dS/m})^2$
 b) Distribución de la CE_f en (10^{-3} dS/m) , obtenida del proceso de Kriging. L:mínimo, H:máximo.

Figure 3. a) Semivariogram of electrical conductivity EC of free aquifer, obtained from VES, the exponential fitting model and its parameters. Semivariance expressed in $(10^{-3} \text{ dS/m})^2$.
 b) Distribution of EC_f in (10^{-3} dS/m) , obtained from process of kriging. L: minimum, H: maximum

Para la CE_s, no se evidencia una distribución preferencial de los valores, se observa un mínimo cerca de la ciudad de Arrecifes, y otro hacia el norte; mientras que en la zona de bañados y al este de la ciudad de Pergamino se encuentran dos máximos, todos ellos (máximos y mínimos) sobre la margen izquierda.

Se analizó la relación entre la CE_s y la CE y profundidad de la freática. Para ello, se asoció a cada muestra de suelo el valor de las propiedades del agua obtenida de los SEV más cercanos. No se observó correlación entre estas variables. De la correlación múltiple entre CE_s y las propiedades del acuífero freático y la topogra-

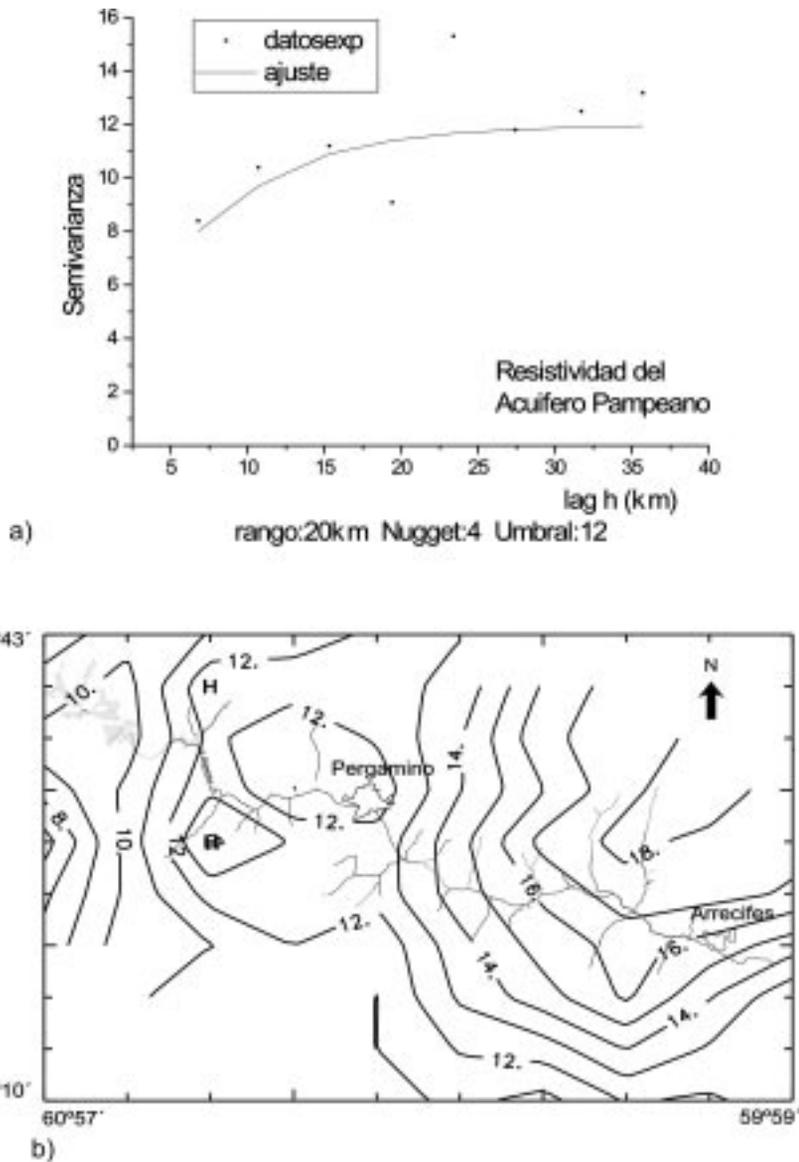


Figura 4. a) Semivariograma de la resistividad de la capa, correspondiente al acuífero pampeano, el modelo de ajuste exponencial y sus parámetros. Semivarianza expresada en $(\text{ohmm})^2$. b) Distribución de la resistividad eléctrica del acuífero Pampeano, en ohmm, obtenida del proceso de Kriging. L:mínimo, H:máximo.

Figure 4. a) Semivariogram of electrical resistivity of the layer, corresponding to the Pampeano aquifer, the exponential fitting model and its parameters. Semivariance expressed in $(\text{ohmm})^2$.

b) Distribution of electrical resistivity of the Pampeano aquifer, in ohmm, obtained from process of kriging. L: minimum, H: maximum

fía se desprende que la última resultó con coeficiente significativo con signo negativo (coeficiente de correlación de 0,48); lo que implica un aumento de la CEs en zonas to-pográficamente bajas.

La clasificación de los sitios con distinto grado de riesgo respecto de la salinización y sodificación del suelo, debido a la aplicación de riego complementario (Figura

6) mostró que el 70% de las muestras evaluadas poseen características aceptables para la aplicación de esta técnica.

Entre los sitios no recomendables, existen dos para los cuales la CEs excede los 2 dS/m, condición de salinidad preexistente independientemente de la conductividad del agua a utilizar.

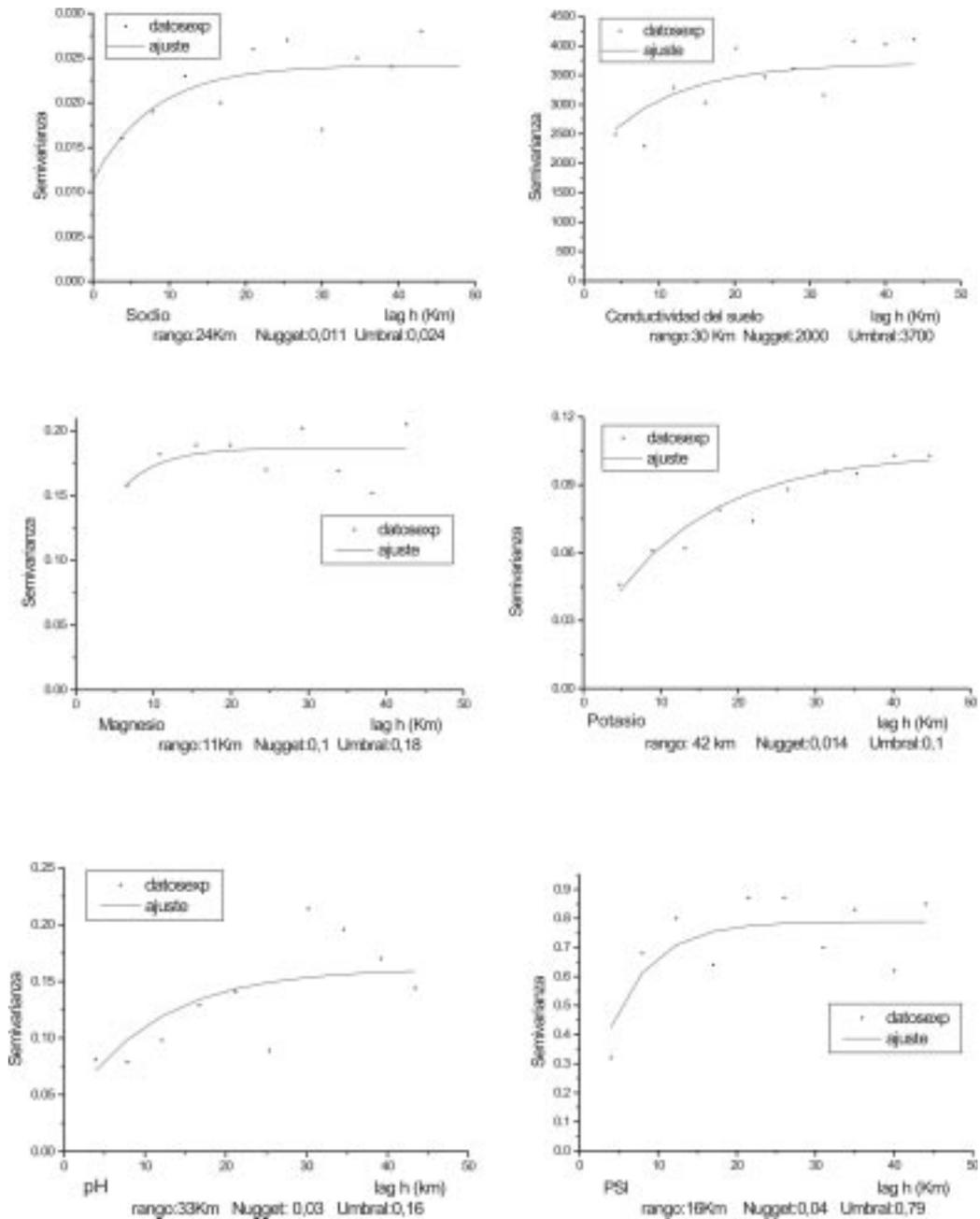


Figura 5. Distribución del Na, pH, K, Mg (cmol/kg), CE (10^{-3} dS/m) y PSI (%), interpolado por kriging.
 Figure 5. Distribution of Na, pH, K, Mg (cmol/kg), CE (10^{-3} dS/m) and PSI (%), interpolated by kriging.

En cuanto a la sodificación, tres sitios presentaron valor de PSI por encima de diez, para los cuales es irrelevante analizar el RAS del agua correspondiente dada su natural baja estabilidad coloidal.

DISCUSIÓN

La discusión de los resultados de los semivariogramas y de las distribuciones espaciales de las propiedades se vería enriquecida con un mayor número de datos expe-

Tabla 1 Parámetros estadísticos clásicos: valor medio, desviación estándar (SD) y coeficiente de variación (CV) de las propiedades del suelo: cationes intercambiables, P extractable, C total, Conductividad eléctrica, pH, PSI y CIC.

Table 1. Classical statistical parameters: average, standard deviation (SD) and coefficient of variation of measured soil properties: Exchangeable cations, extractable P, total C, Electrical conductivity, pH, ESP and CEC.

Propiedad	Na cmol _c /kg	Mg cmol _c /kg	K cmol _c /kg	Ca cmol _c /kg	P ppm	C %	CE dS/m	pH	PSI %	CIC cmol _c /kg
media	0,35	2,4	1,46	11,5	23,9	1,97	0,257	6,4	1,95	18,4
SD	0,14	0,45	0,31	2,34	16	0,44	0,071	0,43	0,87	1,87
C.V.	41,6	18,8	21,80	20,3	66,8	22,45	27,6	6,7	44,9	10,2
mínimo	0,19	1,8	0,9	8,42	3,9	1,28	0,130	5,6	0,95	15
máximo	0,9	3,88	2,11	16,7	64,5	2,9	0,430	7,95	5,1	22,5

Tabla 2. Variación (de los datos experimentales en comparación con la carta de suelos INTA, (1972) del contenido de K, Na, Ca y Mg según la serie de suelos.

Table 2. Variation (of experimental data compared with soil, reference documents INTA, 1972) of K, Na, Ca y Mg contents according to soil series.

series de suelos	carta de suelos	datos exp. valor medio	variación en porcentaje	carta de suelos	datos exp. valor medio.	variación en porcentaje
POTASIO	cmol _c /kg			SODIO	cmol _c /kg	
Arroyo Dulce	2,1	1,18	▼ 44%	0,4	0,4	=
Arrecifes	2,3	1,24	▼ 46%	0,2	0,4	△ 50%
Pergamino	1,6	1,48	▼ 7,5%	0,6	0,34	▼ 44%
Rojas	2,3	1,6	▼ 30%	0,3	0,34	=
Las Gamas	2,6	1,6	▼ 38%	2,3	0,3	▼ 87%
CALCIO	cmol _c /kg			Magnesio	cmol _c /kg	
Arroyo Dulce	16,1	12,2	▼ 25%	2,1	2,1	=
Arrecifes	14,4	12,9	▼ 9%	2,1	2,1	=
Pergamino	11,5	11,8	=	3,1	2,3	▼ 25%
Rojas	15,2	11,2	▼ 26%	1,9	2,4	△ 26%
Las Gamas	11,6	10,2	▼ 12%	5,7	2,8	▼ 50%

rimentales. Sin embargo, asumiendo la escasez de perforaciones y el número de muestras de suelos, los mapas obtenidos pueden proporcionar una aproximación acerca de la tendencia regional en el comportamiento de las propiedades. La bondad del ajuste en los semivariogramas se encuentra entre el 7 y el 15%, siendo aceptable teniendo en cuenta el conjunto de datos considerados, a excepción del pH que fue del 22%.

El nivel freático presenta un comportamiento homogéneo en la zona oeste de Pergamino y un gradiente pronunciado en las inmediaciones de Arrecifes, indicando que el flujo subterráneo es en dirección NO-SE y coincide con la dirección principal de las aguas superficiales, tal como se ha encontrado también en el SE de la pro-

vincia de Buenos Aires. Dado que el ajuste del modelo del semivariograma de CE_f no fue óptimo dicha correlación espacial debe tenerse en cuenta con cierta reserva.

La distribución de la resistividad del acuífero Pampeano, está correlacionada espacialmente hasta los 20 km, y presenta, una zona central homogénea en una franja que comprende desde M. Alfonso hasta la ciudad de Pergamino, con una tendencia general de aumento de la resistividad de oeste a este, implicando que la salinidad del agua del acuífero Pampeano disminuye en dirección a la ciudad de Arrecifes, coincidiendo con los antecedentes bibliográficos de la zona. De la comparación entre los valores de las isolíneas de la CE_f y la resistividad (inversa de la conductividad) del Pampeano, se observó

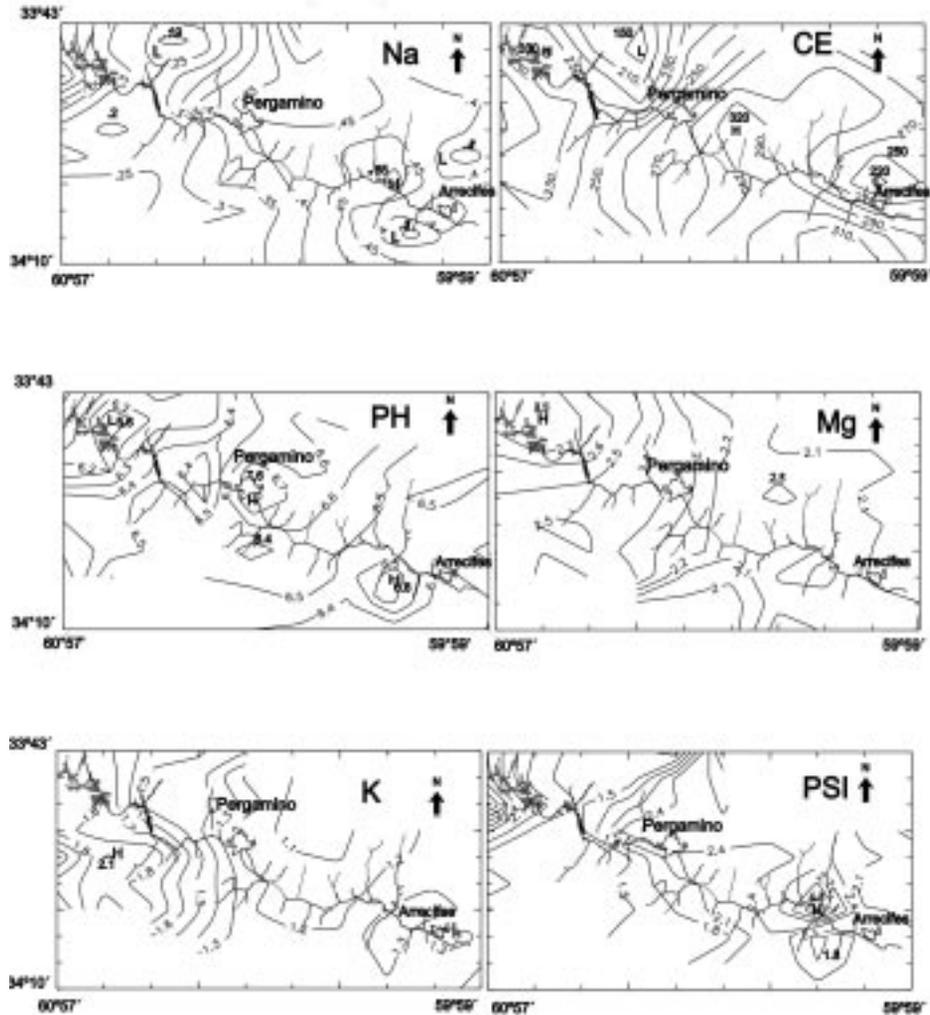


Figura 6. Clasificación de los sitios evaluados en cuanto al grado de riesgo de salinización y/o sodificación de los suelos, por la aplicación de riego complementario.

Figure 6. Classification of sites evaluated according to the grade of risk of salinization and/or sodification of soils, by the application of complementary irrigation.

que al este de Pergamino los valores de conductividad del acuífero freático son superiores a los de los niveles más profundos del Pampeano.

En cuanto a las propiedades del suelo, es de notar que la dotación de K es la única que presenta una clara disminución con el tiempo (entre el 7 y el 46%) en todas las series de suelos presentes, manteniéndose esa tendencia para los valores del contenido de Ca, excepto en la serie Pergamino donde se mantuvo constante. El contenido del Mg y Na presentan comportamientos distintos según la serie de suelos a la que pertenecen dichas muestras. El pH no evidenció cambios sustanciales, en la comparación con los datos de la carta, manteniéndose sus valores cercanos a 6,2 (Las Gamas y Rojas) y 6,5 (A.

Dulce, Arrecifes y Pergamino); sólo en tres sitios se encontraron valores cercanos a 8, que coincidieron puntualmente con valores altos de PSI (próximos a 20) y de Na (más de 4 cmol_c/kg).

En el caso del contenido de Na, Mg y CEs la correlación espacial fue moderada (cociente *Nugget*/Umbral entre 25 y 75%, según Cambardella *et al.*, 1994) mientras que para K y PSI resultó fuerte (<25%). La ausencia de correlación (efecto *Nugget* puro) se presentó en el contenido de Ca, C, P y CIC; esto implicaría la necesidad de un muestreo más intensivo (menor a 3 km para la escala de trabajo utilizada). En el caso del P, se puede inferir que la variabilidad, podría estar asociada a las distintas prácticas de fertilización; mientras que los diferentes

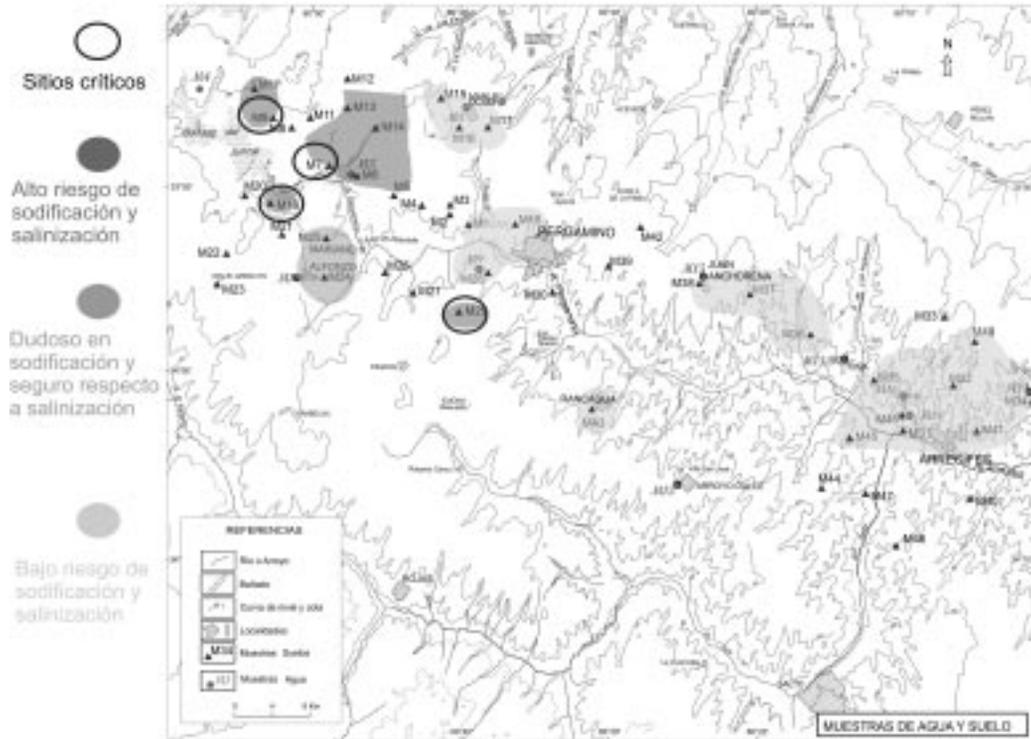


Figura 7. Clasificación de los sitios evaluados en cuanto al grado de riesgo de salinización y/o sodificación de los suelos, por la aplicación de riego complementario.

Figure 7. Classification of sites evaluated according to the grade of risk of salinization and/or sodification of soils, by the application of complementary irrigation.

tipos de manejo de los suelos podrían influir en la falta de correlación para el C.

La CE_s no evidencia una distribución preferencial de los valores, pero la margen derecha presenta características más homogéneas con una leve tendencia ascendente hacia el SE. Las diferentes características entre ambas márgenes del arroyo podrían atribuirse a que los suelos de la región se han desarrollado sobre materiales loésicos de distinta granulometría según el área de deposición, siendo en general más gruesos sobre la margen derecha del arroyo Pergamino, donde domina la Serie Rojas con suelos de mejores características físicas que sobre la margen izquierda donde prevalecen los suelos de la Serie Pergamino.

Analizando en forma conjunta los mapas de distribución del Na y la CE_s se puede observar una coincidencia en la ubicación de dos zonas que presentan un mínimo al NO y al SE sobre la margen izquierda. Hay un aumento general de ambas propiedades hacia el SE hasta el oeste de la ciudad de Arrecifes. Los rangos de correlación son del mismo orden, lo que permitiría un muestreo conjunto

de ambas variables; ambas propiedades se incrementan en zonas de bajos topográficos coincidiendo con lo expresado por Pepi *et al.* (1998).

Comparando el tratamiento clásico de los datos con el geoestadístico, en el primer caso los coeficientes de variación CV (Tabla 1) no presentaron correspondencia unívoca con los resultados geoestadísticos, implicando que los CV altos no señalan falta de correlación espacial y viceversa.

Dado que no se observó correlación entre la CE_s y CE_p, se restringió el análisis a los seis sitios con profundidades de la freática menores a 2,5 m sobre los veinticinco estudiados; bajo esta consideración se encontró una moderada correlación positiva.

En cuanto a la clasificación de los sitios de riesgo potencial a la salinización y sodificación del suelo, la mayoría resultaron aceptables para la práctica de riego complementario. De los sitios que no resultaron de este modo, el 90% se encuentra sobre la margen izquierda, específicamente en el NO de la zona de estudio, donde es alta la conductividad del agua de las perforaciones.

Esta diferenciación entre ambos márgenes coincide con lo encontrado por Sainato *et al.* (2001), en cuanto a que existen diferencias en la morfología del acuífero Pampeano en ambos márgenes del arroyo Pergamino, con una disminución de su salinidad hacia Arrecifes.

CONCLUSIONES

En la zona de estudio, el agua freática posee un mayor estado de mineralización que los niveles más profundos del acuífero Pampeano. El flujo freático tiene dirección NO-SE acompañando la topografía. La salinidad de los niveles en explotación en el área de estudio disminuye hacia la zona de Arrecifes.

Se visualiza cierto deterioro en las propiedades edáficas a través del tiempo, observándose que la dotación de K disminuyó en toda la zona, mientras que el contenido de Ca y la CIC decayeron en cuatro de las series de suelos presentes (excepto en Pergamino).

Los contenidos de K, Mg, Na, la conductividad eléctrica del suelo, el pH y el PSI mostraron una distribución homogénea en la zona comprendida entre las ciudades de Pergamino y Arrecifes, mientras que un mayor gradiente de las variables, se presenta al NO de Pergamino y en la cercanía de Arrecifes.

En sitios donde el nivel freático es muy somero, que son las condiciones donde el fenómeno de capilaridad puede afectar al suelo, la conductividad eléctrica del suelo aumentó con la del agua.

El mapa de riesgo de la zona estudiada, para la cuenca del arroyo Pergamino-Arrecifes, presenta una zona acotada de problemas severos, en cuanto a la salinización y/o sodificación de suelos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Buenos Aires.

BIBLIOGRAFÍA

Andriulo, A.; Ml.Galetto; C Ferreira; G Cordone & C Sasal *et al.* 1998. Efecto de 11 Años de riego complementario sobre un Argiudol típico Pampeano. *Ciencia del Suelo* 16 (2): 125-127.

Cambardella, C.; T. Moorman; J. Novak; T. Parkin; R. Turco & A. Konopka. 1994. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58 (5): 1.501-1.511.

Galindo, G.; C Sainato; C Dapeña; JL Fernández Turiel & D Gimeno *et al.* 2002. Natural and anthropogenic features influencing water quality in NE Buenos Aires, Argentina. *Actas International Congress of Hydrogeology*. Mar del Plata, CDRom.

Genova, LJ. 1992. Evaluación del impacto del riego complementario en suelo Argiudol Típico de Pergamino, Provincia de Buenos Aires. Convenio SAG y P- II CA, 18 p.

GEO-EAS. (Geostatistical Environmental Assessment Software) 1988. EPA, Systems Laboratory, Las Vegas- USA.

INTA. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360-32 (Pergamino), Hoja 3560-3 (Salto), Hoja 3560-2 (Rojas). Buenos Aires, Argentina.

INTA. 1999. Recomendaciones para la utilización de aguas para riego en función de su calidad, síntesis de los trabajos realizados en las unidades del INTA-IPG. Impacto Ambiental del riego complementario, seminario de capacitación, Pergamino, 87 p.

Losinno, B; O Heredia; C Sainato; L Giuffré & G Galindo. 2002. Impacto potencial del riego con agua subterránea sobre los suelos en la cuenca del arroyo Pergamino, Pcia. de Bs. As., Argentina. *Ecología Austral* 12: 55-63.

Or, D & J Hanks. 1992. Soil water and crop yield spatial variability induced by irrigation nonuniformity. *Soil Science of American Journal*, 56: 226-233.

Page, AL; Rh Miller & DR Keeney (eds.) (1982). Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties. *Agronomy N°9 (2nd edition)*. (ASA- SSSA. Publ: Madison, WI, USA)

Peinemann, N; M Díaz Zorita; MB Villamil; H Lusarreta & D Grunewald. 1998. Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la Llanura Pampeana. *Ciencia del Suelo* 16: 39-42.

Pepi, MI; GA Grosso & M Diaz-Zorita. 1998. Contenido salino del agua freática vinculado al tamaño de partículas de los suelos del noroeste bonaerense (Argentina). *Ciencia del Suelo* 16 (2):122-124.

Sainato, C; G Galindo; MC Pomposiello & H Malleville. 1997. Hidrogeología de la cuenca del arroyo Pergamino. *Actas de la 19º Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*. San Juan, vol 1, p 415.

Sainato, C; B Losinno; A Landini; MC Pomposiello & H Malleville. 2001. Estudio de los acuíferos de la zona de Arrecifes (Pcia. de Bs. As., Argentina) mediante sondeos eléctricos verticales. *Actas del 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. CD ROM. Salvador. Brasil.

Sainato C; G Galindo; C Pomposiello; H Malleville; D De Abelleira & B Losinno. 2003. Electrical conductivity and depth of groundwater at the Pergamino zone (Buenos Aires Province, Argentina) through vertical electrical soundings and geostatistical analysis. *J. of South American Earth Sciences* 16 (2): 177-186.

Santa Cruz, J & A Silva Busso. 1995. Disponibilidad del agua subterránea para riego complementario en las Pcias. de Bs. As., E. Ríos, Córdoba y Santa Fe. Programa de Servicios Agrícolas Provinciales. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.(Argentina), 55p.

Statistix, Versión 1.0.1996. Analytical Software, Windows Version.

Warrick, A & Dr Nielsen. 1981. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In: Hillel D. Practical Applications of Soil Physics*: 319-344.

Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *In: Springer-Verlag (Eds), Advances in Soil Science*, Vol. 3. New York Inc.