

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL

Carlos Bongiorno⁽¹⁾, Marcelo Varni⁽²⁾ y Pablo Weinzettel⁽²⁾

⁽¹⁾ Becario C.I.C., ⁽²⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras
C.C. 44, (7300) Azul, Tele-fax: 02281-432666, e-mail: varni@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

Se analiza la calidad de las aguas subterráneas con referencia a su aptitud para riego en la cuenca del arroyo del Azul, centro de la Provincia de Buenos Aires. Adicionalmente, se analizan también los suelos de la cuenca. El análisis se hace en un conjunto de lugares elegidos con apoyo en una regionalización ecológica previa de la cuenca. La aptitud del agua para regar se verifica a través de dos criterios: el del Laboratorio de Salinidad de Riverside (Richards, 1973) y el de Ayers y Westcot (1985). A pesar de las críticas que puedan hacerse del primero, aquí se lo utiliza dado su difusión generalizada. En ninguno de los criterios se presentan severas limitaciones en cuanto a la calidad del agua, aunque las limitaciones tienden a crecer en el sentido del flujo subterráneo. Se puede llegar a conclusiones análogas con respecto a la aptitud de los suelos, con limitaciones moderadas en la cuenca baja.

Palabras clave: aptitud del agua para riego, aptitud de los suelos para ser regados.

ABSTRACT

The groundwater quality in the Azul creek basin, center of Buenos Aires Province, is analyzed with reference to its aptitude for irrigation. Additionally, are also analyzed the soils of the basin. The analysis is made in a group of places selected with support in a previous ecological regionalization of the basin. The water aptitude for irrigation is verified through two approaches: that of the Laboratory of Salinity of Riverside (Richards, 1973) and that of Ayers and Westcot (1985). In the two approaches no severe limitations are presented for the quality of the water, although the limitations spread to grow in the sense of the underground flow. Similar conclusions are reached with regard to the soils aptitude, with moderated limitations in the low basin.

Keywords: groundwater quality for irrigation, soils aptitude for irrigation.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio corresponde a la cuenca del arroyo del Azul, ubicada en el partido del mismo nombre y situado en el centro de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). Una porción muy poco significativa de la cuenca pertenece al ámbito serrano del Sistema de Tandilia, correspondiendo la mayor proporción de la cuenca a un ambiente de llanura. La cobertura de sedimentos por encima del basamento rocoso es de unos pocos centímetros en el sur (sector serrano), y hasta algo más de 500 m en el norte de la cuenca, a la altura de la localidad de Cacharí (Méndez Escobar *et al*, 1993; Varni *et al*, 1999). El basamento rocoso es de edad precámbrica y está constituido por rocas metamórficas, granitos y tonalitas. Este basamento cristalino aflora en las cabeceras del arroyo del Azul (González Bonorino *et al*, 1956). La cubierta de sedimentos de esta región corresponde a las formaciones Pampeano y Postpampeano. El Pampeano, originado en el período Plio-Pleistoceno, está constituido por sedimentos predominantemente limosos con fracciones subordinadas de arena y arcilla, de color generalmente castaño con tonalidades que van desde el amarillento al rojizo oscuro (Fidalgo *et al*, 1975). Estos sedimentos Pampeanos son principalmente de origen eólico, fluvial y lacustre. Por lo general los sedimentos incluyen impregnaciones de carbonato de calcio que originan en gran parte de la región, principalmente en la cuenca baja, mantos más o menos continuos de tosca (Sala *et al*, 1987). Sobre los depósitos del Pampeano suprayacen en forma discontinua sedimentos limo-arenosos eólicos y otras litologías de origen fluvial y lacustre correspondientes al Postpampeano.

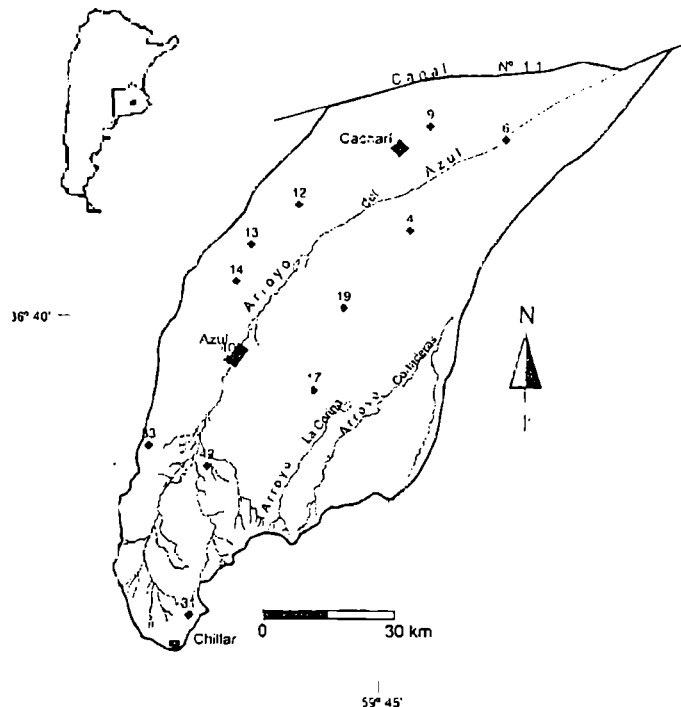


Figura 1: Cuenca del arroyo Azul y ubicación de los pozos muestreados.

En la zona estudiada la disponibilidad de agua superficial para ser usada en riego es mínima. Por lo tanto, se hace indispensable el uso de los recursos subterráneos. El loess pampeano se comporta como un acuífero importante para la región con una transmisividad aproximada para la parte media de la cuenca de $600 \text{ m}^2/\text{día}$ (Sala *et al.*, 1987), aunque existen nuevos ensayos que indicarían que la transmisividad es bastante mayor que este valor. Este acuífero es libre y el único existente en la zona bajo estudio. Aunque el acuífero es heterogéneo y existen niveles con permeabilidades menores, éstos no son continuos, y el acuífero puede calificarse como único y multiunitario (Sala *et al.*, 1987). En la ciudad de Azul, donde existen perforaciones profundas se ha verificado que la calidad de las aguas profundas es de similares características a las someras. De hecho, altos contenidos de nitrato generados en la parte superior del acuífero son captados por los filtros de las perforaciones profundas. Desde 1987 hasta 1997 se han controlado los niveles freáticos en la cuenca periódicamente por medio de censos de perforaciones en el ámbito rural y desde 1997 hasta la actualidad los niveles freáticos se controlan cuatrimestralmente mediante una red de 40

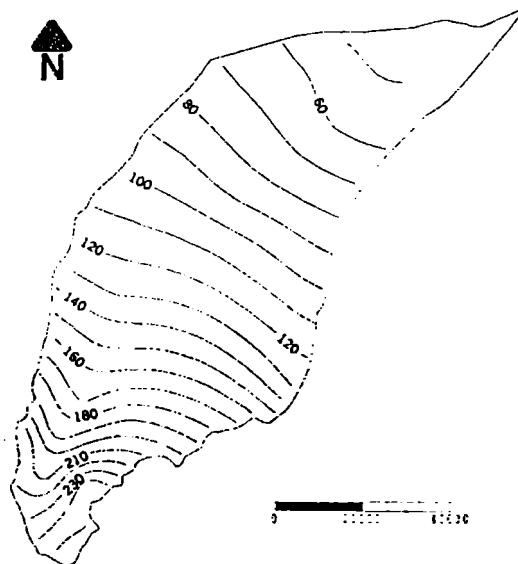


Figura 2: Curvas equipotenciales del acuífero freático (metros sobre el nivel del mar).

perforaciones construidas al efecto por el IHLLA. Estos registros permitieron comprobar la constancia temporal en la conformación de la red de flujo, con fluctuaciones de niveles pero con la misma morfología de las curvas equipotenciales (Figura 2), manteniendo un sentido de flujo sudoeste-noreste.

La región posee, según la clasificación agro-climática de Köppen, un clima templado húmedo con influencia oceánica. Las precipitación media anual es de 918.0 mm (1911-2002). En los últimos diez años el promedio de precipitaciones se ha incrementado significativamente hasta los 1079.9 mm (1993-2002). A pesar de producirse las mayores precipitaciones en verano, los elevados valores que alcanza la evapotranspiración hacen que el balance de agua sea deficitario en esos meses, que es justamente cuando se requiere del riego complementario.

El riego en nuestro país se expandió durante el siglo pasado y especialmente entre 1950 y 1970. A partir de 1970 el ritmo de desarrollo se resintió y el área se estabilizó en 1.250.000 ha, con algún repunte en años recientes. En 1988 la superficie total bajo riego relevada en el país era de 1.246.788 ha (INDEC, 1988; SAGPyA, 1995). Actualmente se presenta en algunas áreas de nuestro país un deterioro de los suelos especialmente por salinidad y sodicidad como consecuencia del manejo

incorrecto del riego.

En la provincia de Buenos Aires desde hace un tiempo se ha producido un proceso de agriculturización, por medio del cual tierras que tradicionalmente estaban reservadas para las prácticas ganaderas han sido dedicadas a la agricultura. Este proceso ha ido acompañado por una serie de demandas que acompañan a las prácticas agronómicas, entre ellas el riego.

El área de estudio se encuentra dentro de la región Pampeana y en ella el riego es utilizado para aumentar o estabilizar en el tiempo el rendimiento en la producción de granos y forrajeras. La rentabilidad del riego en esta región es dependiente de muchos factores económicos que han resultado altamente variables en nuestro país tales como los factores relativos a la exportación (cambio, cotización internacional del grano) y los costos internos (insumos, impuestos, etc). Hasta el presente la tecnología del riego no se ha desarrollado plenamente debido a los factores recién comentados sumados a problemas con la transferencia de tecnología para sistemas irrigados, con las ofertas de capacitación, y en el conocimiento sobre la disponibilidad y sustentabilidad de los recursos hídricos (SAGPyA, 1996). Esta última es la motivación del presente trabajo, que pretende caracterizar la calidad de aguas subterráneas para su utilización en riego complementario.

METODOLOGÍA

Los análisis para determinar la calidad de agua se realizaron en las muestras extraídas en 15 puntos distribuidos en la cuenca del Arroyo del Azul. En la Figura 1 se muestra la ubicación de estos puntos, que fueron elegidos por medio de los siguientes criterios de selección:

- los puntos debían coincidir con perforaciones de la red de monitoreo de aguas subterráneas del IHLLA (IHLLA, 1996),
- debían representar distintas regiones ecológicas homogéneas,
- debían distribuirse espacialmente lo más uniformemente posible en toda la cuenca, y
- descartar los puntos con presencia de impedimentos físicos, horizontes cálcicos y petrocálcicos en los cuales es imposible muestrear con barreno.

El segundo criterio mencionado se basó en una regionalización ecológica de la cuenca que contempla distintas condiciones existentes principalmente en cuanto a los tipos de suelo. La mencionada regionalización ha sido realizada en la cuenca del arroyo del Azul por el IHLLA (2000) teniendo en cuenta variables naturales. Tal regionalización está constituida por una subdivisión en ecosistemas regionales de características internas homogéneas, utilizando datos edáficos, fisiográficos, topográficos y de relevamiento en campo. En el presente trabajo se ha tenido en cuenta esta subdivisión distribuyendo los puntos de muestreo y ensayos dentro de cada región. En el mencionado informe se definen 6 regiones para la cuenca del arroyo Azul, (Figura 3), las cuales presentan las siguientes características:

- Región 1: Abarca un área de 776,6 km². Presenta suelos del tipo Natracuoles y Natracualfes típicos. Su relieve es de pendientes bajas y un alto índice de anegabilidad.
- Región 2: Abarca un área de 835,3 km². El tipo de suelo corresponde a los Natracuoles. El relieve es de pendientes bajas con alta anegabilidad.
- Región 3: Cubre un área de 972,8 km². Los suelos son de los tipos Natracuoles Natracualfes típicos. El relieve es de pendiente muy baja con los máximos valores de anegabilidad.
- Región 4: Cubre un área de 1383,3 km². Los tipos de suelo de esta región corresponden a Argiudoles típicos, Argialboles, Hapludoles líticos y Complejos indiferenciados. Los ambientes fisiográficos corresponden a ambientes serranos, periserranos y afloramientos rocosos, al sur; y llanuras aluviales y planicies de derrames, al norte. Las pendientes son las

mayores del área, al sur; y las menores, al norte.

- Región 5: Abarca un área de 570,3 km². Los tipos de suelos corresponden a Argialboles y Natracuoles. La fisiografía es de acumulación-deflación y planicies de derrame. Las pendientes son bajas y la anegabilidad es máxima.
- Región 6: Cubre un área de aproximadamente 1555,2 km². Se presentan Argiudoles típicos y Natracualfés mólicos. Las pendientes presentan valores medios y la anegabilidad es mínima.

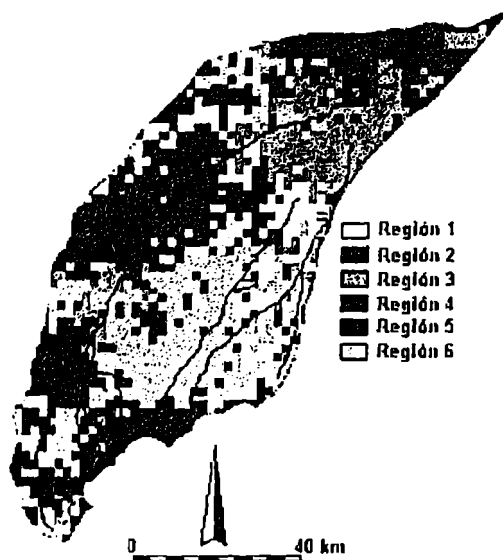


Figura 3: Regiones ecológicas homogéneas de la cuenca del arroyo Azul (Gandini *et al*, 2002).

Como la calidad del agua para riego no se basa en un criterio de calidad absoluto, sino que depende del tipo de suelo sobre el que se regará, también se analizarán las características de los suelos en ubicaciones coincidentes con los muestreos de agua subterránea. Por ello, las determinaciones analíticas se realizaron tanto en el agua del acuífero freático como en agua extraída de muestras de suelo. El agua fue extraída de muestras de suelo de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm de profundidad por medio del barrenado del terreno. Para la extracción de las muestras se utilizó un barreno manual de 2" de diámetro, cuya componente principal es un tomamuestras removible, cilíndrico, de 2" de diámetro y de 20 cm de largo. El tomamuestras fue utilizado para contener a la muestra de suelo y poder trasladarla sin disturbación hasta el laboratorio para su posterior análisis.

El barreno se introdujo en el terreno mediante martillado y se extrajo mediante palanca o con ayuda de extractor hidráulico, según la profundidad del muestreo. En el laboratorio se realizó el pesado de las muestras inalteradas para determinar la humedad real de campo. La extracción del agua del suelo se realizó utilizando la metodología de desplazamiento de la disolución de suelo (Jackson, 1976) usando como líquido desplazante agua desmineralizada. El agua muestreada, luego de que abandonara el suelo fue filtrada mediante papel de filtro, se determinó el volumen colectado y se envasó para el posterior análisis químico. Posteriormente a la realización de la extracción del agua, las muestras de suelo fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105°C y pesadas para determinar el peso seco. La diferencia entre el peso inicial y el peso seco permite obtener el peso de agua contenido en la muestra Ag. El volumen colectado en la extracción V_e y la cantidad de agua real de la muestra Ag permiten calcular la dilución D_i que sufre el agua del suelo:

$$D_i = V_c / A_g \quad (1)$$

Este valor de dilución permitió corregir las concentraciones iónicas del agua del suelo obtenidas en laboratorio.

Se realizaron determinaciones analíticas correspondientes a las concentraciones de Ca^{++} , Mg^{++} y Na^+ mediante espectrofotometría de absorción atómica. Con los valores de estos iones se obtuvo la relación de adsorción de sodio (RAS), según la fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\left(\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}\right)}} \quad (2)$$

Como el RAS de la solución del suelo se equilibrará con el del agua de riego en el largo plazo, el RAS del agua de riego puede ser considerado un buen indicador del riesgo de sodificación del suelo. Si bien Ayers y Westcot (1976) propusieron la utilización de un RAS ajustado incorporando en la fórmula de RAS la concentración de los iones carbonato (CO_3) y bicarbonato (HCO_3), este sobreestima el riesgo de sodificación. Los mismos autores sugieren posteriormente el uso de un factor de corrección de 0.5 para el RAS ajustado o la utilización de la propuesta original para el cálculo del RAS (Ayers y Westcot, 1985).

Por otro lado, se midió la conductividad eléctrica específica (CE) de cada muestra y se normalizó a 25°C de temperatura.

Clasificaciones utilizadas para el agua de riego

Uno de los criterios utilizados fue el del diagrama para la clasificación de las aguas de riego confeccionado por el Laboratorio de Salinidad de Riverside del Departamento de Agricultura de EUA (Richards, 1973). El diagrama, que no se reproduce dada su amplia difusión, está constituido por 16 categorías que se establecen al combinar las distintas clases de las características de CE (C) y peligro de alcalinización del suelo (S). Existen cuatro categorías de CE que van desde agua de baja hasta muy alta salinidad (C1 a C4) y cuatro categorías de alcalinización comprendidas entre agua de bajo RAS, (S1), hasta muy alto, (S4). Si bien este criterio se utiliza mucho en el país, los nuevos resultados experimentales disponibles y la creciente expansión del riego hacia regiones en condiciones naturales y de manejo muy diferentes de aquellas bajo las cuales fue definida, han reducido notablemente su utilización internacional (Prieto y Angueira, 1996). A pesar de estas críticas justificadas, aquí se lo utiliza dado su uso generalizado.

El segundo criterio utilizado es el de Ayers y Westcot (1985), cuyos límites están especificados en la Tabla 1. Este criterio es mucho más realista en cuanto a la posible pérdida en la capacidad de infiltración de los suelos ya que puede advertirse en la Tabla 1 el efecto compensador que ejerce la CE respecto del RAS. En este sentido, el diagrama de Riverside, considera erróneamente el papel que juegan estos dos factores en conjunto, ya que un RAS elevado combinado con baja salinidad del suelo son las condiciones que más predisponen a la alteración de la estructura del suelo.

Tabla 1. Clasificación de aguas para riego según Ayers y Westcot (1985).

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción en el uso		
		Ninguna	Moderada	Severa
Salinidad				
CE	microS/cm	< 700	700 - 3000	> 3000
SDT	mg/l	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltración				
RAS = 0 - 3 CE =		> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
RAS = 3 - 6 CE =		> 1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
RAS = 6 - 12 CE =		> 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
RAS = 12 - 20 CE =		> 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
RAS = 20 - 40 CE =		> 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
Toxicidad específica				
Sodio (Na)				
Riego superficial	meq/l	< 3.0	3.0 - 9.0	> 9.0
Riego por aspersión	meq/l	< 3.0	3.0	
Cloro (Cl)				
Riego superficial	meq/l	< 4.0	4.0 - 10	> 10
Riego por aspersión	meq/l	< 3.0	3.0	
Boro (B)	mg/l	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
Efectos misceláneos (solo afecta cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO3)	mg/l	< 5.0	5.0 - 30	> 30
Bicarbonato (HCO3)	meq/l	< 1.5	1.5 - 8.5	> 8.5
PII			6.5 - 8.4	

Clasificaciones utilizadas para los suelos

En este trabajo se hace una clasificación de los suelos estudiados en cuanto a salinidad y sodicidad, ya que estos aspectos son los de mayor importancia a los fines de riego. Se utiliza para esta clasificación la propuesta por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (Richards, 1973).

Para llevar a cabo esta clasificación es necesario disponer de valores de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y de RAS de la solución del suelo. El PSI puede ser calculado a partir del RAS de la solución del suelo mediante la ecuación ajustada propuesta por el Laboratorio de Salinidad de EUA que se muestra a continuación:

$$PSI = \frac{100(-0.0126 + 0.01475RAS)}{1 + (-0.0126 + 0.01475RAS)} \quad (3)$$

Por otra parte, para la clasificación en rangos de salinidad se utilizan valores de conductividad eléctrica (CE).

Los suelos son clasificados en los cuatro grupos siguientes:

Suelos no salinos – no sódicos o normales: CE < 4000 microS/cm , PSI < 15

Suelos salinos: CE > 4000 microS/cm, PSI < 15

Suelos sódicos: CE < 4000 microS/cm, PSI > 15

Suelos sódicos – salinos : CE > 4000 microS/cm, PSI > 15.

RESULTADOS

En la Figura 4 se ve la distribución espacial de la conductividad eléctrica y del RAS en el agua subterránea. En general, se observa un aumento de ambos parámetros según el sentido del flujo (Figura 2) aunque, principalmente en el caso del RAS se observan algunos valores que no siguen esta tendencia en el centro oeste de la cuenca (Figura 4 derecha).

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los puntos de muestreo, tanto del agua en la zona no saturada en las profundidades de 0 a 20 cm, entre 20 y 40 cm, como en el acuífero freático. Se reportan valores de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y CE, así como de las magnitudes derivadas: relación de adsorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

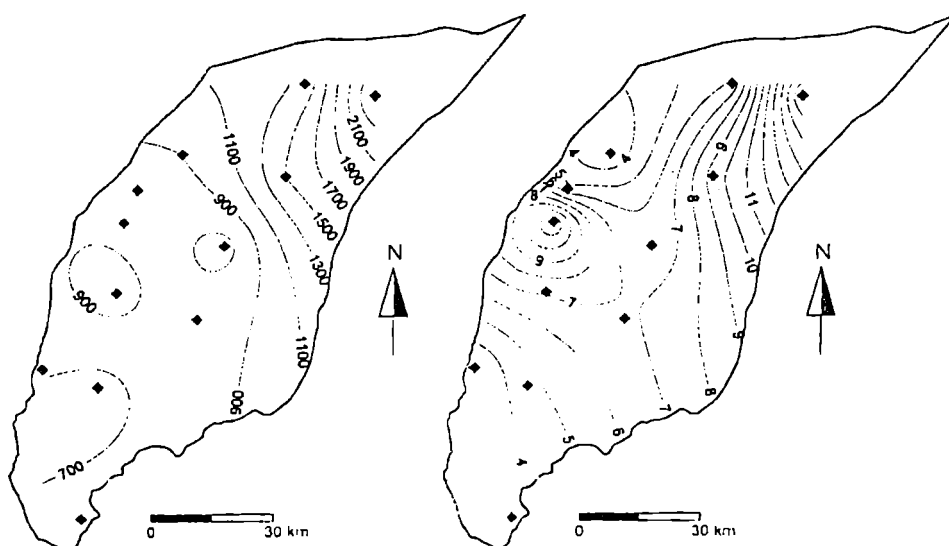


Figura 4: Conductividad eléctrica en microS/cm (izquierda) y RAS (derecha) del agua subterránea.

En las aguas subterráneas la CE varía entre un mínimo de 615 y un máximo de 2540 microS/cm y el RAS entre 3.2 y 17.2.

Puede verse que, en general, la salinidad crece con la profundidad, obteniéndose las mayores concentraciones en el acuífero. Esta situación concuerda con un modelo de recarga local en medio poroso donde las concentraciones crecen en profundidad. Un decrecimiento de la salinidad indicaría la existencia de flujo preferencial (Weinzettel y Usunoff, 1998).

En la Tabla 3 se muestra la clasificación de la calidad del agua teniendo en cuenta su aptitud para riego según los criterios del laboratorio de Riverside y de Ayers y Westcot (1985) para la zona bajo estudio.

Desde el punto de vista de la calidad del agua y teniendo en cuenta la clasificación de Riverside los puntos muestreados pertenecen a cuatro grupos:

- El primer grupo, integrado por los pozos 42, 33, 31 y 19 posee una calidad que presenta riesgo medio con respecto a su salinidad aunque bajo respecto a la sodicidad. Estos puntos se encuentran en la zona sur y central de la cuenca del arroyo del Azul.

- El segundo grupo, integrado por los pozos 40, 17, 4, 9, 12 y 13 posee una calidad de agua con riesgo alto atendiendo a su CE aunque bajo contenido de sodio. Estos puntos pertenecen a la zona norte y central de la cuenca.

Tabla 2. Datos de calidad de agua de muestras extraídas del suelo y del acuífero.

Punto de muestreo	Prof. muest.	Ca		Mg		Na		CE microS/cm	RAS	PSI
		ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l			
40	0 - 20 cm	16.2	0.8	7.7	0.6	9.5	0.4	260.0	0.50	0.00
	20 - 40 cm	20.7	1.0	8.0	0.7	9.5	0.4	269.6	0.40	0.00
	Acuífero	27.7	1.4	15.7	1.31	261.6	8.7	1100	7.60	
42	0 - 20 cm	28.3	1.4	4.4	0.4	25.6	1.1	457.3	1.20	0.50
	20 - 40 cm	100.5	5.0	60.3	5.0	18.0	0.8	745.7	0.30	0.00
	Acuífero	26.8	1.3	6.0	0.5	103.5	4.5	638.4	4.70	
24	0 - 20 cm	24.2	1.2	25.1	2.1	57.6	2.5	744.8	2.00	1.70
	20 - 40 cm	66.7	3.3	50.9	4.2	82.0	3.6	2348.0	1.80	1.40
	Acuífero	29.6	1.5	10.5	0.9	102.5	4.4	722.0	4.10	
33	0 - 20 cm	9.4	0.5	4.0	0.3	21.6	0.9	402.0	1.50	0.90
	20 - 40 cm	14.1	0.7	10.1	0.8	34.3	1.5	594.5	1.70	1.20
	Acuífero	42.5	2.1	12.0	1.0	87.6	3.8	712.8	3.00	
31	0 - 20 cm	18.7	0.9	4.0	0.3	17.4	0.8	311.7	1.00	0.20
	20 - 40 cm	33.4	1.7	11.0	0.9	12.1	0.5	315.4	0.50	0.00
	Acuífero	24.8	1.2	17.1	1.4	98.5	4.1	750.4	3.70	
17	0 - 20 cm	5.2	0.3	3.3	0.3	9.4	0.4	214.3	0.80	0.00
	20 - 40 cm	24.8	1.2	5.8	0.5	14.1	0.6	221.6	0.70	0.00
	Acuífero	16.3	0.8	8.1	0.7	136.2	5.9	787.7	6.90	
19	0 - 20 cm	6.6	0.3	1.4	0.1	24.4	1.1	215.2	2.20	1.90
	20 - 40 cm	10.2	0.5	5.1	0.4	30.2	1.3	275.1	1.90	1.50
	Acuífero	18.1	0.9	8.5	0.7	121.5	5.3	615.5	5.90	
4	0 - 20 cm	20.9	1.0	35.8	3.0	85.5	3.7	1101.1	2.60	2.50
	20 - 40 cm	5.5	0.3	7.3	0.6	57.3	2.5	757.3	3.70	4.00
	Acuífero	35.5	1.8	14.2	1.2	265.1	11.5	1508.7	9.50	
6	0 - 20 cm	32.9	1.1	8.4	0.7	139.5	6.1	819.5	6.40	7.60
	20 - 40 cm	41.6	1.4	11.4	1.0	184.9	8.0	952.5	7.40	8.80
	Acuífero	26.5	1.3	30.4	2.5	493.9	21.5	2540.6	17.20	
9	0 - 20 cm	61.6	2.1	89.4	7.5	1031.0	44.8	4214.0	20.50	22.40
	20 - 40 cm	78.1	2.4	106.6	8.9	843.2	36.7	3759.7	15.40	17.70
	Acuífero	50.1	2.5	33.5	2.8	227.6	9.9	1337.1	6.10	
12	0 - 20 cm	8.2	0.3	7.2	0.6	95.6	4.3	567.5	6.50	7.70
	20 - 40 cm	3.8	0.1	8.8	0.7	70.0	3.0	389.9	4.60	5.20
	Acuífero	56.4	2.8	16.6	1.4	106.6	4.6	900.4	3.20	
14	0 - 20 cm	12.0	0.4	2.4	0.2	45.8	2.1	259.0	4.0	4.4
	20 - 40 cm	14.3	0.4	3.6	0.3	62.9	2.7	334.1	4.5	5.1
	Acuífero	11.3	0.6	3.9	0.3	186.1	8.1	1206.0	12.1	
13	0 - 20 cm	1.8	0.0	10.5	0.9	165.9	7.2	1206.0	10.8	12.7
	20 - 40 cm	21.5	0.4	10.2	0.9	173.7	7.6	1033.6	9.5	11.3
	Acuífero	33.6	1.7	9.1	0.8	152.4	5.8	854.7	5.2	

- El pozo 14 presenta alto riesgo de salinidad y riesgo medio de sodificación. Está ubicado en la zona media de la cuenca.
- El pozo 6 tiene un riesgo muy alto de salinidad y riesgo medio por su contenido de sodio, y se ubica en la parte baja de la cuenca.

Cuando se tiene en cuenta la clasificación de Ayers y Westcot (1985) para la calidad del agua de

riego los puntos muestreados se presentan agrupados por sus restricciones de la siguiente manera:

- Pozos con aguas con ninguna restricción respecto a salinidad y moderada en infiltración: pozos 42 y 19, en cuenca alta y media, respectivamente.
- Pozos con aguas con restricción moderada respecto a salinidad y sin restricciones en infiltración: pozo 33, en cuenca alta.
- Pozos con aguas con restricción moderada respecto a la salinidad y moderada en infiltración: aquí se ubican la gran mayoría de los pozos: 40, 31, 17, 4, 6, 9, 12 y 13.
- Pozos con aguas con restricción moderada respecto a salinidad y severa en infiltración: pozo 14, en cuenca media.

Podemos ver que existen diferencias en los criterios de las dos clasificaciones. Ambas asignan a los pozos 42, 19 y 33 pocas restricciones tanto en salinidad como en sodicidad (una nula y otra moderada, en cada caso). En general, los pozos restantes tienen riesgo moderado. El pozo 6 presenta restricciones muy altas de salinidad y los pozos 40, 17, 4, 9, 12 y 13 altas según Riverside, pero según Ayers y Westcot (1985) hay limitantes sólo moderadas. El criterio de Riverside es notablemente más exigente respecto de la salinidad. El pozo 14 presenta grandes limitaciones según ambos criterios, aunque está ubicado en la cuenca media. Sin duda, se trata de una singularidad.

Es importante tener en cuenta que las muestras de agua son extraídas de la superficie del acuífero freático ya que no se cuenta en las proximidades de los puntos de muestreo con pozos de profundidades similares a los usados en riego. Cabe destacar que en la cuenca los pozos de riego deben tener profundidades de entre 60 y 90 m para obtener un caudal suficiente. De todas maneras, como ha sido mencionado con anterioridad, no se han detectado cambios de calidad significativos en el acuífero en profundidad.

Tabla 3. Clasificación de la calidad del agua por su aptitud para riego según Riverside y Ayers y Westcot (1985) en el sector de estudio.

Lugar de Muestreo	Calidad Riverside	Calidad de agua según Ayers y Westcot (1985)	
		Salinidad	infiltración
40	C3-S1	Moderada	moderada
42	C2-S1	Ninguna	moderada
33	C2-S1	Moderada	Ninguna
31	C2-S1	Moderada	moderada
17	C3-S1	Moderada	moderada
19	C2-S1	Ninguna	moderada
4	C3-S1	Moderada	moderada
6	C4-S2	Moderada	moderada
9	C3-S1	Moderada	moderada
12	C3-S1	Moderada	moderada
14	C3-S2	Moderada	Severa
13	C3-S1	Moderada	moderada

Desde el punto de vista de la calidad de los suelos los puntos muestreados no presentan condiciones de sodicidad y/o salinidad. Solamente en el punto 9, correspondiente a la zona baja de la cuenca, el suelo es salino de 0 a 20 cm y sódico entre 20 y 40 cm. Este resultado es razonable, ya que en la cuenca alta y media (hasta la ciudad de Azul) predominan los suelos Argiudoles en los que

prácticamente no hay presencia de sodio y varios de los otros suelos presentes son hiposódicos (Pazos et al, 2002) según la clasificación de FAO (1998). En los suelos de la cuenca baja comienza a crecer el contenido de sodio en la medida en que nos adentramos en la zona deprimida de la cuenca del río Salado. En principio, un análisis similar puede hacerse respecto al contenido salino.

CONCLUSIONES

Aunque existen variantes en la aptitud de las aguas subterráneas para riego según se use el criterio de Riverside o el de Ayers y Westcot (1985) la casi totalidad de los pozos muestreados no presenta restricciones o restricciones sólo moderadas en cuanto a salinidad y sodicidad. La calidad se va degradando tanto en salinidad como en sodicidad según el sentido del flujo de las aguas subterráneas, pero sin alcanzar importantes limitaciones dentro de la cuenca. En la medida en que se ingrese en la zona más deprimida de la cuenca del río Salado la calidad se degradará significativamente.

Las limitaciones de los suelos para ser regados sigue un patrón de variación similar al antes comentado sobre las aguas subterráneas. En la cuenca existe preponderancia de suelos hiposódicos en las zonas alta y media y con contenido de sodio creciente pero no altamente limitante para el riego en la cuenca baja. Es razonable esperar que aguas abajo de la cuenca el contenido de sodio aumenten.

En resumen, y aunando ambos criterios, no existen limitantes importantes en cuanto a calidad de aguas y suelos para la aplicación de riego en las zonas alta y media de la cuenca del arroyo del Azul, mientras que la calidad, tanto en salinidad como en sodicidad, se va degradando en el sentido del escurrimiento de las aguas subterráneas, en la medida en que nos adentramos en la zona deprimida de la cuenca del río Salado.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1976. "Water quality for agriculture". FAO Irrigation and Drainage Paper No 29, Roma, 97 p.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1985. "Water quality for agriculture". FAO Irrigation and Drainage Paper No 29 rev 1, Roma.
- FAO 1998. "World reference base for soil resources". World Soil Resources Reports No. 84, FAO, UN, Rome, Italy, 88 p.
- Fidalgo, F., De Francesco, F. y Pascual, R. 1975. "Geología superficial de la llanura bonaerense". Relatorio de la Provincia de Buenos Aires, 105-106.
- Gandini, M., Entraigas, I. y Usunoff, E. 2002. "Ecological regionalisation of Azul creek basin: Dynamic analysis". Proceedings 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment "Information for Sustainability and Development", 8 -13.
- González Bonorino, F., Zardini, R., Figueroa, M. y Limousin, T. 1956. "Estudio geológico de las sierras de Olavarría y Azul (Provincia de Buenos Aires, Argentina)". LEMIT. Serie 2, No.63, 5-23.
- Jackson, M.L. 1976. "Análisis químicos de suelos". 3a. Edición, Ed. Omega, Barcelona, 662 p.
- IHLLA 1996. "Red de monitoreo de las aguas subterráneas en la cuenca del arroyo del Azul". Inédito, 77 p.
- IHLLA 2000. "Avance metodológico en el tratamiento de los recursos hídricos en una cuenca de llanura". Inédito.
- INDEC 1988. "Censo nacional agropecuario".
- Méndez Escobar, R., Usunoff, E. y Weinzettel, P. 1993. "Aportes al conocimiento del subsuelo de la cuenca del arroyo azul (Provincia de Buenos Aires)". V Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales, 2: 55 – 60.
- Pazos, M.S., Roca Pascual, N. Y Mestelán, S. 2002. "The significance of soil classification for non-soil scientists. An Argentinian experience". Actas XVII Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Bangkok, Tailandia, 14 al 21 de agosto de 2002. Versión CD Rom Symp. 21, 321-1 - 321-10.
- Prieto, D. y Angueira, C. 1996. "Métodos de riego. Módulo II: Calidad de agua para riego". INTA. 94 p.
- Richards, L. A., 1973. "Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos". 6ª Edición. Editorial Limusa,

México, 172 p.

- Sala, J.M., Kruse, E. Y Aguilino, R. 1987. "*Investigación hidrológica de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires*". Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Informe 37, 235 p.
- SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, pesca y Alimentación, Pcia. Bs. As.) 1995. "*Programa Servicios Agropecuarios Provinciales*".
- SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, pesca y Alimentación, Pcia. Bs. As.) 1996. "*Riego complementario en sistemas productivos sustentables de la región pampeana*", 16 p.
- Varni M., Usunoff, E., Weinzettel, P. y Rivas, R. 1999. "*Groundwater recharge in the Azul aquifer, central Buenos Aires Province, Argentina*". *Physics and Chemistry of the Earth*, 24(4), 349-352.
- Weinzettel, P. y Usunoff, E. 1998. "*Inicio de la caracterización de la zona no saturada en la cuenca del arroyo del Azul*". *Actas 5as. Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonacrenses*, 51-58.