

## **CALIDAD HIDROQUÍMICA DEL RECURSO HÍDRICO EN UNA CUENCA ENDORREICA DEL SUDOESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

Mario Eduardo Sequeira<sup>(1)(2)</sup>, Sandra Noemi Fernández<sup>(1)</sup>, Juan Darío Paoloni<sup>(2)</sup>, Elida Carmen Fiorentino<sup>(3)</sup>,  
Martín Esposito<sup>(3)</sup> y Pablo Javier Antonelli<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur (UNS) - Avda. Alem 1253, (8000), Bahía Blanca

<sup>(2)</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>(3)</sup> Dpto. de Agronomía – Universidad Nacional del Sur  
sequeira@criba.edu.ar y sanfer@criba.edu.ar

### **RESUMEN**

La calidad hídrica es un término relativo, referido a la composición del agua cuando es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas. Como tal, es un término neutral que no puede clasificarse como bueno o malo sin hacer referencia al uso para el cual el agua es destinada. El objetivo de este trabajo es analizar la calidad hidroquímica del recurso hídrico de la cuenca endorreica de la laguna de Puán, Provincia de Buenos Aires, y su aptitud para uso agropecuario y consumo humano. Se consideraron datos proporcionados por el municipio y se tomaron muestras del nivel freático y de la laguna. Se midieron factores físico-químicos como el pH, la conductividad eléctrica, cantidad de sales y ciertos oligoelementos. Los resultados determinan aguas subterráneas mayoritariamente dulces, moderadamente duras, aptas para la ganadería y buenas para riego con baja peligrosidad salina y moderada peligrosidad sódica. También se observan elementos nocivos como As, V, F y Cr, que en algunas muestras superan los valores máximos admitidos para el consumo humano y pueden generar enfermedades de origen hídrico a mediano y/o largo plazo. Los resultados del agua de la laguna reflejan una aptitud nula para todo tipo de consumo.

**Palabras claves:** Recurso Hídrico, Cuenca Endorreica, Calidad del Agua, Hidroquímica

### **ABSTRACT**

Water quality is a relative term which refers to those water components affected by substances produced by natural processes or human activities. As such, it must be considered as a neutral term that qualifies water as good or bad referring to the implication of its use. The purpose of this work is to analyze the hydrochemistry of water resources from an endorheic watershed known as Laguna de Puán, located in the south-west of Buenos Aires Province, and to determine the water quality for farming use and human consumption. Data provided by the municipal authorities were considered and samples of the water table and lake were taken. Physicochemical factors as pH, electric conductivity, several salts and oligoelements were measured. Research results determine that underground waters are mainly freshwaters, with good aptitude for cattle raising and irrigation but low salted and moderately sodic risk. Noxious elements as As, V, F and Cr are observed. Some samples overcome maximum admitted values for human consumption and may generate diseases in the medium/long term. Lake water results show useless aptitude for any kind of use.

**Key words:** Hydric Resource, Endorheic Watershed, Water Quality, Hydrochemistry

## INTRODUCCIÓN

La relevante importancia de la gestión de los recursos naturales y en especial del agua, ha motivado y motiva permanentemente la planificación de estudios regionales destinados a la evaluación de los aspectos que hacen al diagnóstico de este recurso. El suroeste de la Provincia de Buenos Aires es una región caracterizada por una importante actividad agropecuaria de secano y con riego y una creciente concentración urbana industrial. La necesidad de conciliar aspectos generales y particulares condicionan un desarrollo en etapas de los estudios regionales, llevándose a cabo a través de relevamientos de diversos espacios territoriales, a fin de lograr un diagnóstico sobre la calidad del agua freática.

La cuenca de la laguna de Puán (Figura 1) se ubica en el geoambiente denominado de llanura pedemontana (VLlp), que comprende las tierras por sobre la cota de 250 msnm, conformando el piedemonte distal y proximal del Sistema serrano (Figura 2). El territorio se sitúa en la transición de los paisajes pampeano y patagónico, teniendo por tipo morfológico dominante a la llanura. En la orla de piedemonte, es notable la desaparición superficial de los cursos emergentes de las sierras, indicando un predominio de la infiltración que aporta al escurrimiento hipodérmico y freático. Ya en la superficie, en cambio se implanta un drenaje lacunar que encadena escurrimientos difusos de patrón cuasi radial (González Uriarte, M. et al, 2002).



Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

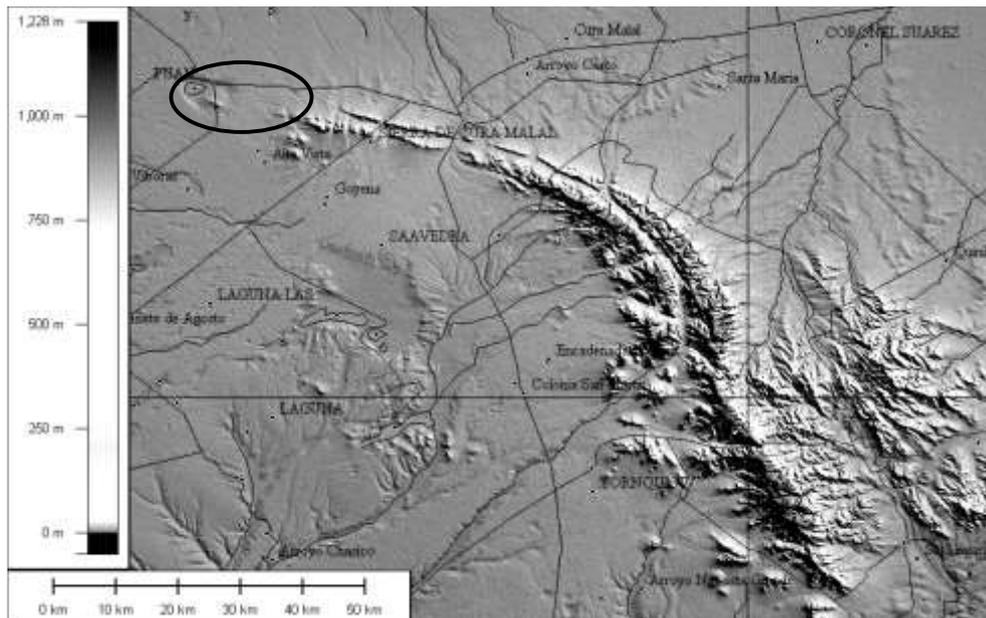


Figura 2. Ámbito físico de la zona en estudio

La laguna de Puán presenta una gran variabilidad en su superficie, alcanzando en la actualidad una extensión superficial del orden de las 700 has., incluyendo una isla de 25 has. La laguna está alimentada principalmente por el aporte de carácter torrencial de las precipitaciones, que se encauzan en dos pequeños arroyos semipermanentes de escaso caudal, que bajan de los cerros vecinos. El espejo de agua nunca se ha secado totalmente, pero en los años 1909 a 1910, a raíz de una prolongada sequía, quedó reducido notablemente al punto tal que podía ser atravesado sin dificultad con los medios de transporte de la época.

El incremento promedio de las precipitaciones, especialmente a partir de fines de la década del 60, fue

acompañado por un continuo aumento de la cota de la laguna afectando en 1992 a ciertos sectores del casco urbano de la localidad de Puán (Sequeira, et al, 2004). Este hecho obligó a las autoridades a iniciar acciones conjuntas con la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Buenos Aires.

Las variables climáticas y el marco geomorfológico descrito, marcan las pautas de funcionamiento del sistema de la cuenca endorreica de la laguna de Puán (Figura 3). Posee un área de aproximadamente 10000 has., donde las precipitaciones son las generadoras de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales, dando lugar a la configuración de la red de drenaje y principalmente recargando los acuíferos.

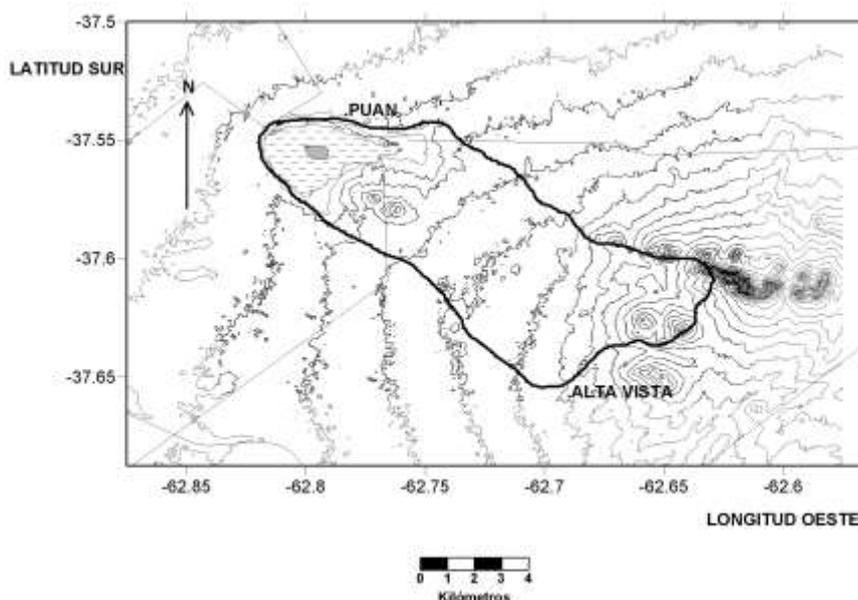


Figura 3. Cuenca endorreica de la laguna de Puán

Emplazada en su orilla, la localidad de Puán reviste especial importancia pues constituye la ciudad cabecera de la unidad del Partido, unidad de gestión político-administrativa provincial ubicada entre los  $37^{\circ} 22'$  y  $38^{\circ} 49'$  de latitud sur y  $62^{\circ} 30'$  y  $63^{\circ} 23'$  de longitud oeste. Dicha ciudad capital posee una población aproximada a los 5000 habitantes, y en el partido totaliza alrededor de 18000 habitantes distribuyéndose en algunos centros urbanos y en un importante asentamiento rural de pequeños abastecimientos. La productividad principal (agrícola-ganadera) y la ausencia de cursos fluviales y una cierta restricción hídrica en el clima, hacen que el recurso agua dependa en forma primordial del acuífero freático, tanto para consumo humano-animal, como para la creciente asistencia con riego complementario (Fiorentino et al, 1998).

El Ministerio de Agricultura de la Nación, entre los años 1921 y 1934, analizó el agua de la laguna. De los resultados analíticos, el agua fue calificada en una categoría extraordinariamente fuerte -clorosulfatada sódica-, de mineralización exagerada e hipertónica (Informe de la Comisión Nacional de Climatología y Aguas Minerales, 1937). Cabe destacar que durante ese período la máxima extensión areal estimada de la laguna sería del orden de las 400 has (alrededor del 57 % de la superficie actual).

En este trabajo, se propone analizar la calidad hidroquímica del recurso hídrico, en el ámbito físico conformado por la cuenca topográfica endorreica aportante a la laguna de Puán.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA

En diversos trabajos previos, se determinaron: la cuenca endorreica de la laguna de Puán, sus parámetros hidromorfológicos, las relaciones área–volumen correspondientes a las alturas del cuerpo de agua, la clasificación hidrológica de las características de su suelo y la estimación del riesgo hídrico que representa la laguna sobre la localidad homónima empleando modelos de balances hídricos mensuales seriados y de Índice de severidad de sequía (Palmer) (Sequeira et al, 2004 y Sequeira et al, 2006) y las características generales de la hidroquímica regional de las aguas subterráneas del sudoeste bonaerense y sudeste pampeano (Fiorentino et al, 1998, Paoloni et al, 2000, González Uriarte et al, 2002 y Paoloni et al, 2003).

Para la evaluación hidroquímica preliminar, se tuvo en cuenta la información aportada por el relevamiento en la cuenca de 65 perforaciones distribuidas dentro y fuera de la misma, realizado por la Municipalidad de Puán, donde se determinaron la profundidad del nivel de la freática con relación a la superficie y la obtención de una muestra de agua para precisar el contenido de sales solubles totales para cada caso.

En función de estos resultados, se planificó un muestreo hidroquímico puntual de los siguientes elementos: bicarbonatos ( $\text{CO}_3\text{H}^-$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), cromo (Cr), Cadmio (Cd), ciertos poluentes en las aguas de origen natural como arsénico (As), boro (B), y fluor (F), sodio ( $\text{Na}^+$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ), calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), bario (Ba), nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) y vanadio (V). Además, se midieron conductividad eléctrica (Ce), temperatura y pH. En total son 11 posiciones de muestreo: 1 en la laguna y 10 en perforaciones distribuidas en el área de la cuenca (Figura 4). Estas últimas aprovechan el acuífero freático, principal fuente de aprovisionamiento para los diferentes usos locales. La explotación del recurso hídrico se efectúa a través de las tradicionales bombas de émbolo, impulsadas por energía eólica (molinos) y en algunos casos con el uso de bombas centrífugas accionadas eléctricamente. Las muestras se tomaron por duplicado en envases de 500 cc. y se llevaron a cámara fría hasta su procesamiento en laboratorio. Se tomaron además datos de profundidad mediante sonda piezométrica, posicionamiento y altura del terreno mediante sistema GPS.

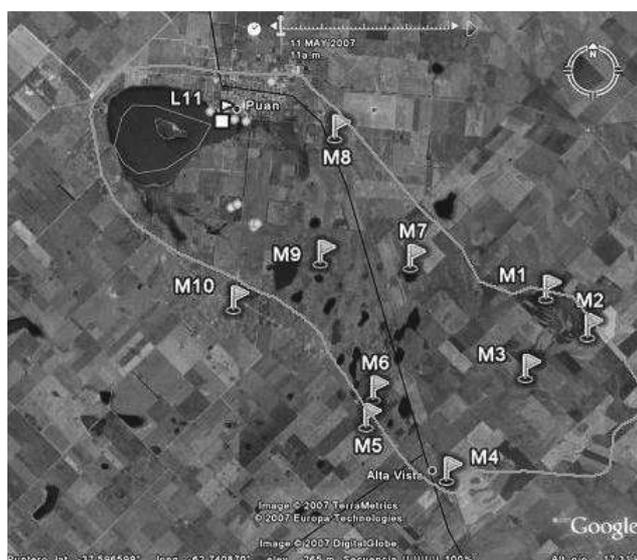


Figura 4. Ubicación de las muestras hidroquímicas

Los análisis hidroquímicos para la determinación cuali-cuantitativa se llevaron a cabo en los laboratorios del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y del LANAQUI (Laboratorio de Análisis Químicos) del CERZOS (Centro de Estudios de Recursos de las Zona Semi-árida, UNS – CONICET), empleándose en cada

caso las siguientes técnicas: fluor, método electro-métrico con electrodo positivo; boro, arsénico y vanadio, equipo analizador de plasma (Induced Coupled Plasma – ICP); sales solubles totales, puente de conductividad; pH, electrodo; nitrato y fosfatos, test colórimetros y demás técnicas de análisis de rutina.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Hidrología Subterránea

Las formaciones geológicas como portadoras de acuíferos están compuestas por depósitos sedimentarios (Pampeano), representados por fracciones limosas, arenosas y arcillosas, con presencia de material calcáreo en forma de mantos, entre los cuales se observan afloramientos que conforman potentes bancos (Sala et al, 1983) de edad del Plioceno y Pleistoceno (Hidalgo et al, 1975). En general son materiales acuíferos con

permeabilidad que en algunos casos llega a valores del orden de 5 a 10 m/día (Sala, 1975).

La característica y conformación de la morfología de la freática pueden evaluarse a partir del relevamiento de base mencionado, confeccionado los mapas de *isohipsas*, que son curvas que unen puntos de igual carga hidrostática con referencia al plano topográfico (Figura 5) y de *isobatas*, donde se grafican las curvas que unen puntos de igual profundidad freática, con relación a la superficie del terreno (Figura 6) (Custodio y Llamas, 1976).

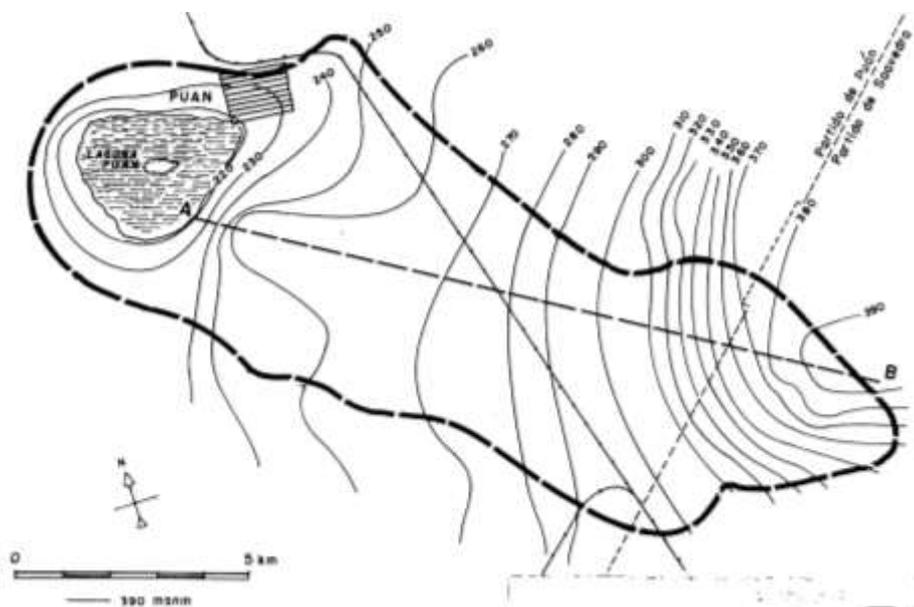


Figura 5. Mapa de isohipsas

Del análisis del mapa de isohipsas se desprende que el área de recarga de la cuenca de la laguna de Puán, se encuentra en la vertiente extrema nor-occidental del Sistema de Ventania (extremo más oriental de la cuenca), mientras que la descarga se produce hacia la depresión que da lugar a la formación de dicha laguna. El mapa muestra una morfología de tipo radial, con gradientes que varían según los distintos sectores de la cuenca, entre 0.0228 a 0.0055 (perfil A – B de la Figura 5 y Figura 7). Se observa un quiebre en la regularidad de las curvas, con una marcada inflexión en el sector central de la cuenca, quedando netamente demarcada el área por los últimos afloramientos rocosos del Sistema (sector del monasterio de Puán).

En cuanto al mapa de isobatas (Figura 6), este muestra la interrelación entre la superficie freática y la superficie topográfica. En la mitad más oriental de la cuenca, es donde se produce el máximo distancia-

miento entre ambas superficies, hasta valores mayores de 70 m, mientras que el máximo acercamiento se manifiesta entre la laguna y el área de los afloramientos rocosos, donde esta situado el monasterio, con valores menores a 5 m.

### Calidad del agua subterránea Acuífero freático

La variación espacial de los valores de sales solubles totales de las muestras de agua tomadas por el municipio, expresados en micro siemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), permitió elaborar un mapa de *isoconductividad* (Figura 8), donde se observa una cierta zonación de menores concentraciones en el área de recarga, incrementándose los valores salinos en forma de bolsones dispuestos en el sector central de la cuenca, tanto en el borde superior como el inferior, y también sobre el extremo occidental del área urbana de la

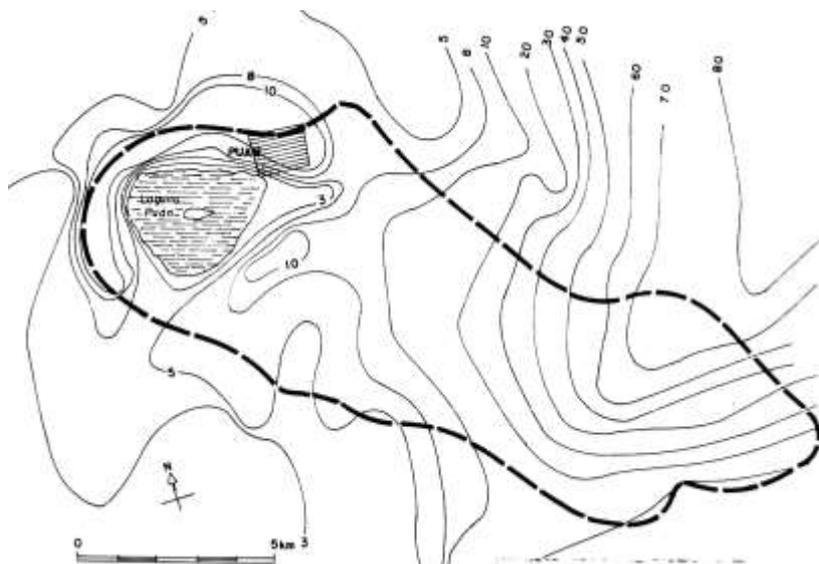


Figura 6. Mapa de isobatas

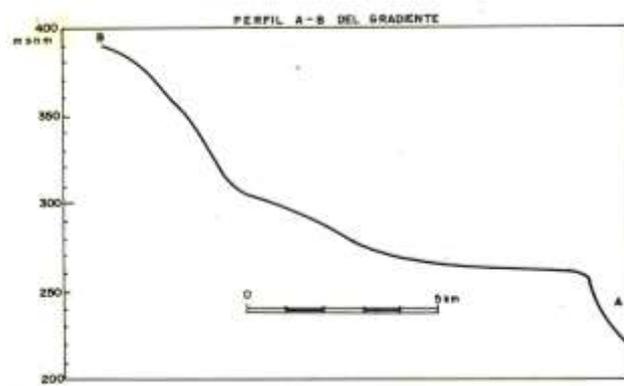


Figura 7. Perfil A-B del mapa de isohipsas

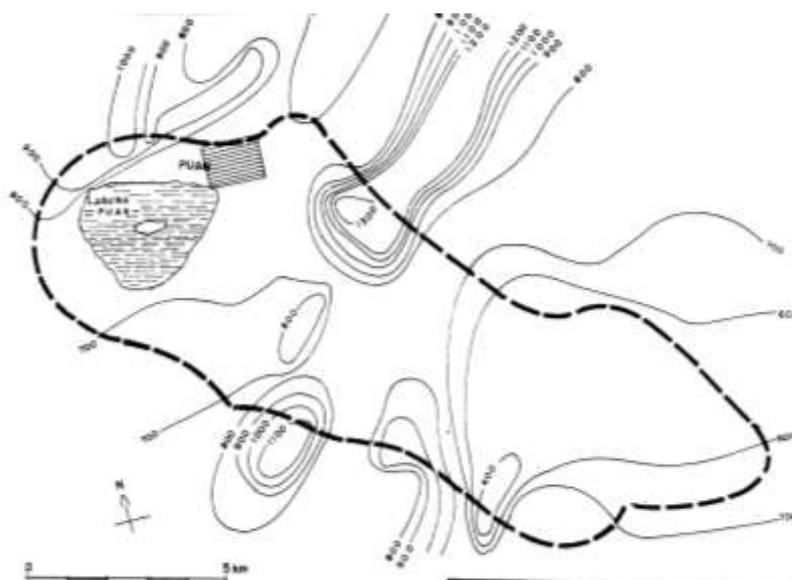


Figura 8. Mapa de isoconductividad

localidad, muy cercana al espejo de agua de la laguna.

**Aptitud de uso**

Los valores de conductividad varían de acuerdo a los siguientes porcentajes del área de la cuenca (Tabla 1).

**Tabla 1. Conductividad y % de área de la cuenca afectados**

| Rango de Conductividad                            | % Area Cuenca |
|---|---------------|
| 395 – 700 $\mu\text{S/cm}$<br>(0.25 – 0.45 g/l)   | 23            |
| 701 – 1000 $\mu\text{S/cm}$<br>(0.45 – 0.64 g/l)  | 65            |
| 1001 – 1353 $\mu\text{S/cm}$<br>(0.64 – 0.86 g/l) | 12            |

Químicamente, a medida que los valores de conductividad decrecen la calidad de las aguas mejoran. Los rangos de conductividad menores de 700  $\mu\text{S/cm}$  son indicadores de agua de buena calidad. A partir de este valor podrían observarse algunas restricciones en cuanto al uso del agua para riego, y a partir de 1500  $\mu\text{S/cm}$ , para uso ganadero (Ayers et al, 1987). Los valores de los análisis físicos-químicos de los pozos muestreados que captan del acuífero freático de la cuenca endorreica y de la laguna se muestran en la Tabla 2. Se presentan los valores límites para las características químicas y sustancias inorgánicas fijados por el Código Alimentario Argentino para la aptitud del agua en alimentación y uso doméstico (CAA, modificación 2007).

**Tabla 2. Análisis físico-químicos de las muestras de pozos (M) y de la laguna (L). Valores límites según CAA**

| Análisis Físico-químicos          | M1    | M2    | M3    | M4    | M5    | M6    | M7    | M8    | M9    | M10   | LII laguna | Max. (s/lag) | Min. (s/lag) | Medio (s/lag) |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|--------------|--------------|---------------|
| CE( $\mu\text{S/cm}$ )            | 500   | 1010  | 530   | 710   | 510   | 630   | 640   | 650   | 720   | 510   | 4010       | 1010.0       | 500          | 641           |
| pH (6.5 – 8.5)                    | 7.2   | 7.5   | 7.7   | 7.4   | 7.4   | 7.4   | 7.3   | 7.6   | 7.5   | 7.5   | 8.9        | 7.7          | 7.2          | 7.5           |
| $\text{CO}_3^{2-}$                | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0        | 0.0          | 0.0          | 0.0           |
| $\text{CO}_3\text{H}^-$ (600 ppm) | 307.1 | 307.0 | 211.5 | 264.4 | 278.6 | 235.9 | 274.6 | 313.2 | 284.7 | 292.9 | 1678       | 313.2        | 211.5        | 277.0         |
| $\text{SO}_4^{2-}$ (400 ppm)      | 23.1  | 68.1  | 30.9  | 34.8  | 28.5  | 114.9 | 67.5  | 65.1  | 69.0  | 36.3  | 693.0      | 114.9        | 23.1         | 53.8          |
| $\text{Cl}^-$ (350 ppm)           | 30.1  | 143.6 | 59.4  | 103.7 | 4.4   | 15.1  | 16.8  | 13.3  | 30.1  | 31.9  | 469.9      | 143.6        | 4.4          | 44.9          |
| N- $\text{NO}_3^-$ (45 ppm)       | 5.7   | 39.8  | 4.9   | 14.8  | 6.0   | 3.4   | 8.4   | 6.3   | 18.3  | 7.4   | 2.1        | 39.8         | 3.4          | 11.5          |
| $\text{Na}^+$ (920 ppm)           | 52.9  | 201.0 | 141.0 | 206.0 | 96.8  | 141.0 | 137.0 | 181.0 | 197.0 | 143.0 | 1325       | 206.0        | 52.9         | 149.7         |
| $\text{Ca}^{++}$ (400 ppm)        | 48.1  | 38.0  | 13.3  | 21.5  | 33.4  | 33.5  | 37.1  | 15.9  | 31.3  | 20.2  | 6.4        | 48.1         | 13.3         | 29.2          |
| $\text{Mg}^{++}$ (60 ppm)         | 14.6  | 15.9  | 6.6   | 7.2   | 11.7  | 14.4  | 12.6  | 7.0   | 11.0  | 8.3   | 12.3       | 15.9         | 6.6          | 10.9          |
| As (0.01 ppm)                     | 0.01  | 0.01  | 0.02  | 0.03  | 0.02  | 0.01  | 0.03  | 0.02  | 0.05  | 0.01  | 0.09       | 0.05         | 0.01         | 0.02          |
| V (0.05 ppm)                      | 0.06  | 0.12  | 0.13  | 0.19  | 0.08  | 0.09  | 0.20  | 0.24  | 0.15  | 0.14  | <0.05      | 0.24         | 0.06         | 0.14          |
| B (2 ppm)                         | 0.22  | 0.44  | 0.36  | 0.42  | 0.30  | 0.31  | 0.40  | 0.48  | 0.37  | 0.31  | 2.91       | 0.48         | 0.22         | 0.36          |
| $\text{F}^-$ (1.2 ppm)            | 1.2   | 1.5   | 2.2   | 2.1   | 1.3   | 1.4   | 1.9   | 2.2   | 1.6   | 1.2   | 10.2       | 2.2          | 1.2          | 1.7           |
| $\text{PO}_4^{3-}$ (0.2 ppm)      | <0.15 | <0.15 | <0.15 | <0.15 | <0.15 | <0.15 | <0.15 | <0.15 | <0.15 | <0.15 | 0.77       | <0.15        | <0.15        | <0.15         |
| Ba (1 ppm)                        | 0.07  | 0.07  | 0.02  | 0.06  | 0.07  | 0.06  | 0.09  | 0.05  | 0.06  | 0.08  | <0.05      | 0.09         | 0.02         | 0.06          |
| Cr (0.05 ppm)                     | 0.03  | 0.14  | 0.06  | 0.10  | 0.01  | 0.02  | 0.02  | 0.01  | 0.03  | 0.03  | 0.47       | 0.14         | 0.00         | 0.04          |
| Cd (0.01 pm)                      | 0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.006      | 0.003        | 0.001        | 0.002         |

Aplicando el diagrama de representación de datos químicos de Schoeller-Berkeloff se infiere que la salinidad del nivel freático en la cuenca se debe a la

presencia del anión bicarbonato y del catión sodio, que son los que ocupan mayor porcentaje, pudiéndose clasificarlas como bicarbonatadas sódicas en

un 90 % del total y bicarbonatadas cálcico-magnésicas el 10 % restante (Figura 9). En lo referente a la calidad del agua de la laguna, la misma presenta elevados valores de conductividad eléctrica

(4010  $\mu\text{S}/\text{cm}$  – muy alta salinidad), manteniendo su clasificación de sódica cloro-bicarbonatada-sulfatada, a pesar de haber alcanzado actualmente el doble del área original.

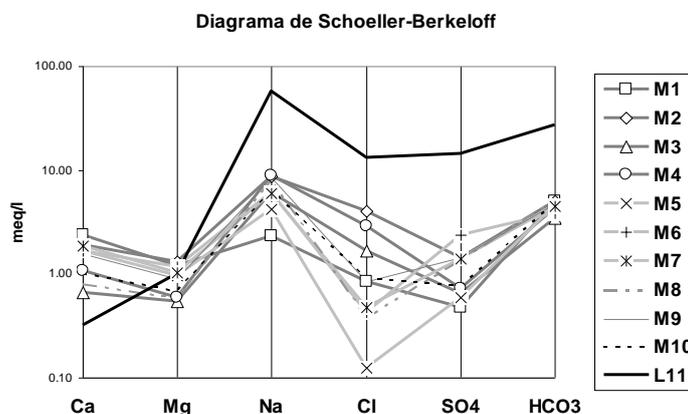


Figura 9. Diferencias hidroquímicas en las aguas muestreadas – Diagrama de Schoeller-Barkeloff

Al estudiar la posibilidad de usar el agua para riego, hay que tener en cuenta que no basta conocer su contenido en sales. Es necesario analizar la naturaleza de éstas, ya que no todas las soluciones salinas producen los mismos efectos, que dependen de su proporción de sodio, solubilidad de las sales, contenido de boro, etc. Para definir la evaluación anterior, se han propuesto numerosos índices, que podemos agrupar en fundamentales y de menor aplicación (Pizarro, 1978). Los primeros involucrarían a la conductividad eléctrica ( $CE$ ), el  $RAS$  y el  $RSC$ , que indican el riesgo de sodificación del suelo y el contenido de *boro*. Los de menor aplicación serían el  $CIP$ , que indica las proporciones nocivas de  $Cl$ , el índice de  $Mg$  y la *proporción de carbonatos y sulfatos*. Estos índices en realidad indican la posibilidad de que un agua, que en su estado natural no es perjudicial, evolucione en el suelo induciendo alteraciones en la solución del mismo o en el complejo de cambio que pueda tener efectos nocivos.

Con respecto a la  $CE$  ya se ha visto el significado de esta medida, que indica la concentración salina de una solución. El  $RAS$  (*Relación de Adsorción del Sodio*) expresa la posibilidad de que el agua de riego provoque la sodificación del suelo, lo que produce una acumulación de sodio intercambiable que tiene una acción dispersante sobre las arcillas y de solubilización de la materia orgánica, que afecta muy negativamente a las propiedades físicas del suelo (agregados menos estables, sellado del suelo, encostamiento y disminución de la conductividad hidráulica), por lo que el medio será menos apto para el

crecimiento de los cultivos. Se define por la ecuación (1), donde los cationes se expresan en  $\text{meq}/\text{l}$ :

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (1)$$

Los valores de  $RAS$  que permiten clasificar el agua de riego en sus distintas clases dependen de la  $CE$  de esa agua, por lo tanto, el *US. Salinity Laboratory* (Pizarro, 1978) ha elaborado una codificación de 16 tipos de agua que es ampliamente utilizada (Figura 10), donde en función de 5 clases de  $CE$  ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y 4 clases de  $RAS$ , que demarcan en cada nivel la aptitud del agua para riego, permiten clasificar lo adecuado o no de su uso (Figura 10 y Tabla 3).

La presencia de aniones carbonatos y bicarbonatos afecta al  $RAS$  de la solución del suelo. El índice  $RSC$  indica la peligrosidad del sodio una vez que han reaccionado los cationes calcio y magnesio con los aniones mencionados. Se calcula mediante la fórmula (2), con los elementos en  $\text{meq}/\text{l}$ .

$$RSC = (CO_3^{2-} + CO_3H^-) - (Ca^{++} + Mg^{++}) \quad (2)$$

Los valores extremos para este índice son 2.5 y 1.25. Por encima del límite superior, indica un agua no aprovechable para el riego y por debajo buena aptitud para el uso (Tabla 3). Valores intermedios clasifican al agua como marginal para el riego. En la evaluación de un agua atendiendo a su  $RSC$  hay que tener en cuenta el tipo de suelo. Un determinado va-

lor puede ser peligroso en un suelo sódico y tener un efecto mejorador en un suelo ácido.

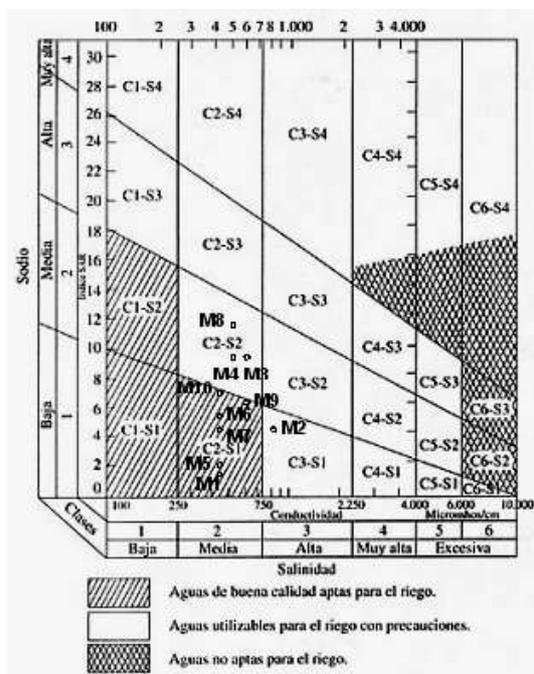


Figura 10. Clasificación del agua de riego (US Salinity Laboratory-Riverside) y ubicación de las muestras analizadas

El boro es un elemento esencial para el desarrollo normal de las plantas, pero si se excede la concentración necesaria puede perjudicar seriamente a los cultivos. El contenido perjudicial depende de los cultivos y se agrupan en tres clases: tolerantes (1 mg/l), semitolerantes (hasta 2 mg/l) y sensibles (hasta 4 mg/l) (Tabla 3).

El índice CIP tiene en cuenta al ión cloro. Clasifica las aguas en 5 clases, desde excelente a inútil, de acuerdo a valores desde 4 a mayores de 20 y está definido por la ecuación (3) (meq/l). Los resultados se muestran en la Tabla 3.

$$CIP = \frac{(Cl + N-NO_3)}{(CO_3^{2-} + CO_3H + SO_4^{2-} + Cl + N-NO_3)} \times 100 \quad (3)$$

Normalmente, el contenido de sales de un agua de riego es insuficiente para perjudicar a los cultivos. Los daños se ocasionan cuando el agua se concentra en el suelo, aumentando la salinidad. Algunos de los índices y clasificaciones estudiados consideran la evolución posible del agua en el suelo (RSC y proporción de carbonatos y sulfatos). Sin embargo, ninguno de ellos es suficiente para definir dicha evolución, por lo que ésta se debe estudiar con detalle, cuantificando las

variaciones que tienen lugar en las concentraciones de las sales y en particular de las pocas solubles, que pueden precipitar al concentrarse el agua, retirando iones de la solución y modificando las proporciones iniciales, con sus correspondientes efectos sobre la adsorción de Na, Mg, etc. (Pizarro, 1978).

En cuanto al contenido del Mg, cuando este se encuentra en la solución del suelo en altas concentraciones se producen ciertos efectos tóxicos, pudiendo inducir deficiencias de Ca en los cultivos. Se expresa por el índice resultante de la ecuación (4) (cationes en meq/l). Un agua se considera peligrosa cuando el índice es superior a 50 (Tabla 3).

$$\frac{(Mg^{++})}{(Ca^{++}) + (Mg^{++})} \times 100 \quad (4)$$

En lo que respecta a la consideración de la proporción de carbonatos y sulfatos, se tiene en cuenta que el ion Ca, aportado por el agua de riego, al concentrarse la solución de suelo, puede ser eliminado al precipitar en forma de carbonato, bicarbonato o sulfato. Igualmente ocurre con el Mg, que puede precipitar en forma de carbonato o bicarbonato. Cuando disminuyen las concentraciones de Ca y Mg, aumenta el RAS y el riesgo de sodificación del suelo. Por lo tanto, el agua de riego se puede clasificar en 4 clases que marcan esta posibilidad de sodificación, desde la I (la más peligrosa) a IV (efecto despreciable) (Tabla 3).

Finalmente consideramos la dureza, considerada como la propiedad de un agua caracterizada por la dificultad de hacer espuma con jabón. Es debida a la presencia de alcalinotérreos (en el agua: Ca y Mg). En la actualidad no presenta interés científico, aunque sí práctico, por los problemas que plantean las aguas duras, especialmente por incrustaciones en las instalaciones de agua. Por razones históricas se mide como mg/l de CO<sub>3</sub>Ca (ecuación (5)), definiéndose rangos que clasifican al agua desde blanda a muy duras (Custodio y Llamas, 1976). Los resultados se muestran en la Tabla 4.

$$Dureza(CO_3Ca) = \left( \frac{Ca(ppm)}{20} + \frac{Mg(ppm)}{12} \right) \cdot 50 \quad (5)$$

En cuanto a su aplicabilidad para ganadería, desde el punto de vista del tenor salino, no cuenta con ningún tipo de limitación según la guía de calidad de agua para ganadería propuesta por FAO (Ayers et al, 1987) sobre la base de los trabajos realizados por la National Academy of Science (1972, 1974).

Tabla 3: Calidad del agua para riego. Índices y clasificaciones

| Muestra | RAS   | Clasificación<br>(US Soil<br>Laboratory) | RSC   | Riesgo de<br>Sodificación | Boro     | CIP Clase   | Índice<br>de Mg | Clase    | Proporción de carbonatos y sulfatos |                                   |         |
|---------|-------|--|-------|---------------------------|----------|-------------|-----------------|----------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------|
|         |       |  |       |                           |          |             |                 |          | Mg+Ca                               | CO <sup>3</sup> H+CO <sup>3</sup> | Clase   |
| M1      | 1.24  | C2-S1                                    | 1.43  | Moderado                  | s/riesgo | 14.6 Mala   | 33.4            | s/riesgo | 3.60                                | 5.03                              | Clase 1 |
| M2      | 5.46  | C3-S1                                    | 1.82  | Moderado                  | s/riesgo | 42.1 Inútil | 40.9            | s/riesgo | 3.21                                | 5.03                              | Clase 1 |
| M3      | 10.34 | C2-S2                                    | 2.26  | Alto                      | s/riesgo | 29.9 Inútil | 44.9            | s/riesgo | 1.20                                | 3.47                              | Clase 1 |
| M4      | 10.53 | C2-S2                                    | 2.67  | Alto                      | s/riesgo | 38.5 Inútil | 35.7            | s/riesgo | 1.67                                | 4.33                              | Clase 1 |
| M5      | 3.15  | C2-S1                                    | 1.94  | Moderado                  | s/riesgo | 4.1 Buena   | 36.6            | s/riesgo | 2.63                                | 4.57                              | Clase 1 |
| M6      | 4.34  | C2-S1                                    | 1.01  | Bajo                      | s/riesgo | 7.1 Media   | 41.5            | s/riesgo | 2.86                                | 3.87                              | Clase 1 |
| M7      | 4.06  | C2-S1                                    | 1.61  | Moderado                  | s/riesgo | 9.4 Media   | 35.9            | s/riesgo | 2.89                                | 4.50                              | Clase 1 |
| M8      | 11.59 | C2-S2                                    | 3.76  | Alto                      | s/riesgo | 6.8 Buena   | 42.1            | s/riesgo | 1.37                                | 5.13                              | Clase 1 |
| M9      | 6.86  | C2-S2                                    | 2.20  | Moderado                  | s/riesgo | 15.8 Mala   | 36.6            | s/riesgo | 2.46                                | 4.67                              | Clase 1 |
| M10     | 7.39  | C2-S2                                    | 3.11  | Alto                      | s/riesgo | 15.5 Mala   | 40.4            | s/riesgo | 1.69                                | 4.80                              | Clase 1 |
| L11     | 78.56 | C5-S4                                    | 26.17 | -----                     | c/riesgo | 24.1 Inútil | 75.9            | c/riesgo | 1.34                                | 27.50                             | Clase 1 |

Tabla 4. Dureza del agua

| Muestra | Dureza<br>(mg/l CO <sub>3</sub> Ca) | Clasificación |
|---------|-------------------------------------|---------------|
| M1      | 181                                 | Moderada      |
| M2      | 162                                 | Moderada      |
| M3      | 61                                  | Ligera        |
| M4      | 84                                  | Ligera        |
| M5      | 132                                 | Moderada      |
| M6      | 144                                 | Moderada      |
| M7      | 145                                 | Moderada      |
| M8      | 69                                  | Ligera        |
| M9      | 124                                 | Moderada      |
| M10     | 85                                  | Ligera        |
| L11     | 68                                  | Ligera        |

En el análisis de las muestras, también se midieron poluentes de origen natural como arsénico (As), fluor (F), boro (B) y vanadio (V) (Tabla 3). En función de los datos expuestos, se puede resaltar que en algunos sectores de la cuenca el acuífero libre presenta tenores de arsénico (As), vanadio (V) y fluor (F), que superan moderadamente, en algunos casos los valores límites permitidos para el consumo humano, de acuerdo a la normativa vigente (Código Alimentario Argentino (CAA), modificación 2007). También se observa algunas muestras con valores superiores a los admisibles en cuanto al cromo (Cr). Los habitantes rurales e incluso urbanos, utilizan el agua freática prácticamente para todos los fines, incluido el consumo, sin embargo, la mayoría de ellos desconocen la calidad del agua que usan, aspecto que se convierte en un riesgo para la salud y para algunas actividades productivas, debido principalmente a los tenores de arsénico y fluor, superiores a los valores guías permitidos: 0.01 mg/l y 1.2 mg/l, respectivamente (CAA). Las diferentes concentraciones de los valores que exceden los límites permitidos para consumo humano y las demandas agrícolas y ganaderas, responden principalmente, al condicionamiento impuesto por los factores geomorfológicos

cos y edáficos en la circulación del agua, determinando un patrón espacial no uniforme (Paoloni et al, 2000 y 2003).

## CONCLUSIONES

El recurso subterráneo por su presencia y distribución en toda el área, es el más seguro e importante como fuente posible de aprovechamiento. Su profundidad variable y en general bastante somera, hace al mismo accesible y fácilmente explotable. Son mayoritariamente dulces, moderadamente duras, aptas para la ganadería, buenas para riego con baja peligrosidad salina y moderada peligrosidad sódica.

En el aspecto cualitativo se manifiestan por predominancia del catión sodio y el anión bicarbonato sobre la totalidad de los componentes que la integran.

En relación a los oligoelementos As, F y V, su detección y distribución permitirá sin ninguna duda comunicar a todos aquellos que de una u otra manera se encuentren relacionados con el consumo y el aprovechamiento del recurso, desde la medicina preventiva, pasando por las explotaciones agrícolas y las demandas ganaderas, hasta los aspectos recreativos y los más ínfimos usos. Por todo ello, el altamente recomendable alertar a los centros de salud y/o órganos de gobierno sobre la presencia natural de estos elementos para contemplar su incidencia sobre la salud de la población.

Los resultados encontrados indican con claridad que se convierte en un problema ambiental la calidad del recurso hídrico, dado que debido a la presencia, aunque moderada de elementos nocivos en el acuífero libre, puede generar enfermedades de transmisión hídrica a mediano y/o largo plazo. Por ello, se recomienda la prospección de fuentes alternativas, como

otros acuíferos y/o el desarrollo y uso de técnicas domiciliarias para hacer el recurso viable.

Los resultados del agua de la laguna reflejan una aptitud nula para todo tipo de consumo.

## REFERENCIAS

- Ayers R. S., Westcot D. W., 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje 29, Rev.1-173.
- Código Alimentario Argentino (CAA), 2007. Modificación del Artículo 982 del CAA, vigente desde el 7 de Junio del 2007. Res. Conj. SPRyRS y SAGPyA. Nro. 68/2007 y Nro. 196/2007.
- Custodio E., Llamas M. R., 1976. Hidrología Subterránea. Tomo I. Editorial Omega, Barcelona, España.
- Fiorentino C. E., Paoloni J. D., Sequeira M. E., Echeverría N., 1998. Detección y Distribución de Arsénico, Fluor, y Boro en aguas subterráneas regionales. Mapas de Riesgo. Actas del XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Conosur, Santa Fé (Argentina). Tomo 3, 71-79.
- González Uriarte M., Paoloni J. D., Navarro E. L., Fiorentino C. E. y Sequeira M. E., 2002. Landscape surface runoff and groundwater quality in the district of Puan, Province of Buenos Aires, Argentine. Journal of Soil and Water Conservation, Vol 57, N3, 192-195.
- Hidalgo F., De Francesco J., Pascual R., 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, Relatorio, 103-108.
- Ministerio de Agricultura de la Nación, 1937. Informe de la Comisión Nacional de Climatología y Aguas Minerales.
- National Academy of Sciences and National Academy of Engineering, 1972. Water quality criteria. U.S.Environmental Protection Agency, Washington DC., Report N° EPA-R 373-033, pp.592.
- National Academy of Sciences, 1974. Nutrients and Toxic substances in water for livestock and poultry. U.S.Environmental Protection Agency, Washington DC, pp.93.
- Paoloni J. D., Fiorentino C. E., Sequeira M. E., Echeverría N., 2000. Spatial variability and concentration of arsenic in the groundwater of a region in southwest of Buenos Aires Province, Argentina. Journal of Soil and Water Conservation, 55 (4), 436-438.
- Paoloni J. D., Sequeira M., Fiorentino C. E., Amiotti N., Vázquez R., 2003. Water resources in the semi-arid Pampa-Patagonia transitional region of Argentina. Journal of Arid Environment 53, 257-270.
- Pizarro F., 1978. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Editorial Agrícola Española, S.A., Madrid, España.
- Sala J. M., 1975. Recursos Hídricos, VI Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, Relatorio, 169-193.
- Sala J. M., González M., Keuse E., 1983. Generalización hidrológica de la Provincia de Buenos Aires, Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras, Actas II, 975-1009.
- Sequeira M. E., Paoloni J. D., Fernández S. N., Antonelli P. J., 2004. Riesgo hídrico en una cuenca endorreica (Laguna de Puán, Provincia de Buenos Aires). Aplicación del modelo de Palmer y comparación con otros métodos. Cuadernos del CURIHAM. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad de Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina. Vol. 10, 73-84.
- Sequeira M. E., Paoloni J. D., Fernández, S. N., Antonelli, P. J., 2006. Balances hídricos seriados aplicados a la cuenca endorreica de la laguna de Puán (provincia de Buenos Aires). Predicción cualitativa de niveles de agua. Resúmenes de la XXIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Vol 1, 91.

*Artículo recibido el 12/2007 y aprobado para su publicación el 03/2009.*