

ANALISIS DE LA RELACION ENTRE UN CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN LA LLANURA PAMPEANA, ARGENTINA

Marcelo Varni¹ & Raúl Rivas²

Resumen - En la denominada Pampa Deprimida el relieve es sumamente llano y abundan pequeñas depresiones que, dadas las características de subhúmeda a húmeda de la llanura, están colmadas de agua gran parte del año y marcan en el paisaje un sinnúmero de cuerpos de agua de variadas dimensiones y de profundidades inferiores a los 2 metros. Estas depresiones juegan un papel aparentemente muy importante aunque aún no dilucidado en el balance hídrico del acuífero freático. Para analizar el funcionamiento hidrológico de estas depresiones se ha seleccionado un cuerpo de agua en el que se registran su nivel y el de las aguas subterráneas, el flujo a través del fondo de la depresión, los contenidos iónicos de las aguas y las variables climáticas.

Los niveles de la laguna están casi continuamente por encima del nivel freático. Esto es especialmente notable cuando los niveles permanecen relativamente bajos. Cuando se producen importantes precipitaciones los niveles se elevan significativamente, alcanzando la laguna en varias oportunidades su nivel de descarga. Es en esos cortos períodos en que el nivel freático puede superar a la laguna.

El análisis a partir de los valores del flujo a través de los sedimentos del fondo del cuerpo de agua permitió obtener un valor de conductividad hidráulica de dichos sedimentos de $1,6 \cdot 10^{-4}$ m/día. También se han obtenido valores de los exponentes de las ecuaciones de agotamiento de la laguna y del agua subterránea.

Palabras clave - llanura pampeana, balance del cuerpo de agua.

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras, CC 44, 7300 Azul, Argentina. Tel/Fax 51 2281 432666. varni@faa.unicen.edu.ar

² Instituto de Hidrología de Llanuras, CC 44, 7300 Azul, Argentina. Tel/Fax 51 2281 432666. rivas@faa.unicen.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En la denominada Pampa Deprimida el relieve es sumamente llano y abundan pequeñas depresiones que, dadas las características de subhúmeda a húmeda de la llanura, están colmadas de agua gran parte del año y marcan en el paisaje un sinnúmero de cuerpos de agua de variadas dimensiones (Figura 1). Estas depresiones juegan un papel fundamental en el balance hídrico del acuífero freático según funcionen como puntos de recarga o descarga de las aguas subterráneas. Sin embargo, no existe una estimación, siquiera grosera, de los volúmenes de agua que pueden transferirse entre ambos ambientes. En este punto radica el principal interés de este trabajo.

El tamaño de estos cuerpos es desde algunas decenas o centenas de metros hasta 2 ó 3 km de diámetro o eje mayor, mientras que las profundidades son raramente mayores a 4 metros y en su gran mayoría inferiores a los 2 metros (Fidalgo, 1983). Son de formas bien definidas (Dangavs, 1998).

En sentido puramente limnológico, las lagunas bonaerenses son equiparables con el *pond* (inglés), el *étang* (francés) y el *teich*, *thumpel* y *weiher* (alemán) (Ringuelet, 1962). Ello se debe a que la diferencia fundamental entre una laguna y un lago clásico no es su extensión sino su profundidad y las lagunas de la provincia de Buenos Aires son someras.

Desde el punto de vista de su estructura y función, las lagunas bonaerenses son de carácter eutrófico. Esta organización ecológica está íntimamente relacionada con las condiciones físico-químicas, hidrológicas, climáticas, bióticas e históricas de la Pampasia (Dangavs, 1998).

La alimentación de estos cuerpos de agua es diversa, dependiendo fundamentalmente de la extensión de su área de aporte superficial. La utilización del término área en lugar de cuenca de aporte se debe a que no existe una cuenca definida y que el área que aporta aguas superficiales a la laguna depende del estado de humedad de la zona. En efecto, en estado de aguas altas las depresiones se interconectan formando redes de flujo de tipo lineal de importante longitud mientras que en períodos más secos las depresiones se hallan aisladas y sólo reciben aguas superficiales de su entorno. No es válido, por lo tanto, el concepto de cuenca en el sentido clásico. Por otra parte, el nivel freático se halla muy cercano a la superficie del terreno por lo que también puede aportar aguas a la laguna. Entonces, la laguna puede estar alimentada por aguas superficiales o subterráneas solamente, o por una combinación de ambas, dependiendo de las condiciones de humedad. La relación inversa también es posible, produciéndose un flujo de agua desde la laguna hacia el medio subterráneo.



Figura 1. Imagen Landsat TM (banda 5) de un sector de la Pampa Deprimida en la zona estudiada. Se observan las diferentes formas de los cuerpos de agua, densidad, interconexión y dimensiones. Escala aproximada 1: 300000.

La composición iónica de las aguas depende también de cuál es la fuente de alimentación de la laguna: si preponderan las aguas superficiales tendrán un contenido salino bajo, mientras que si domina la alimentación de las aguas freáticas su contenido salino será mayor.

ZONA DE ESTUDIO

El cuerpo de agua bajo estudio se ubica en la cuenca del arroyo del Azul (Figura 2), a unos 40 km al norte de la ciudad homónima, y se lo conoce como laguna “El Cuco” (59° 42′33” W y 36° 27′45” S). Se encuentra a 90 msnm, cubre un área de 30 hectáreas y alcanza una profundidad máxima de 1,20 m. En casi todo su perímetro sus límites están bien definidos por una pequeña barranca de unos 30 cm de altura. El fondo del cuerpo de agua está cubierto por una capa de sedimentos de granulometría pelítica de un espesor medio de 30 cm., exceptuando las zonas cercanas al borde en el cual se advierte la presencia de un horizonte petrocálcico. Existe un cauce de régimen temporario que descarga sus aguas en ella y otro en el que descarga sus aguas al alcanzar su nivel máximo.

La pendiente del terreno es extremadamente baja, con valores inferiores al 0.1 %. Por lo tanto, la región se caracteriza por flujos de agua horizontales (tanto superficiales como subterráneos) extremadamente lentos. Las llanuras se caracterizan porque predominan ampliamente los flujos de agua verticales (precipitación, evapotranspiración) por sobre los horizontales (Kovacs, 1983).

CLIMA

La precipitación media anual en la zona estudiada es de 958 mm, registrándose en marzo la precipitación máxima (134 mm) y la mínima en agosto (41 mm). La temperatura media anual es de 14 °C, con una máxima media mensual de 21,5 °C en enero y una mínima media mensual de 7,2 °C en julio. Estos datos han sido registrados en la localidad de Azul y corresponden al período 1960-1995. En la misma laguna “El Cuco” se ha registrado una precipitación media anual de 961 mm para el período 1984-1998.

El clima de la región de acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite es subhúmedo-húmedo, mesotermal, con poca a nula deficiencia de agua (Sala *et al.*, 1987). La evapotranspiración real (ETR) media sería de apenas más de 730 mm/año (Nagy y Auge, 1992; Kruse, 1992) calculando la evapotranspiración potencial mediante el método

de Thornthwaite (1948) y la real mediante el balance de Thornthwaite y Mather (1957). Otras metodologías arrojan valores de ETR significativamente mayores (Varni y Usunoff,

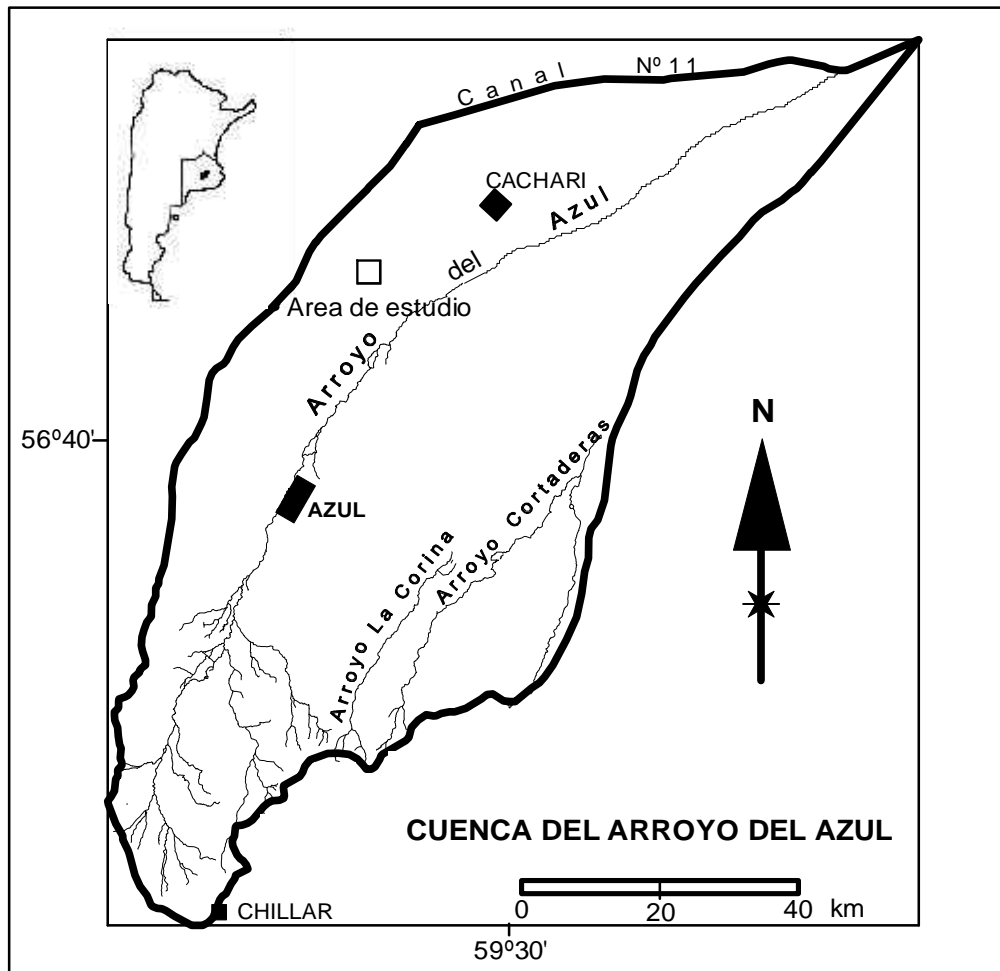


Figura 2. Ubicación del área de estudio.

1999). En general, se presentan excesos pluviométricos en otoño (marzo-abril) y déficit en los meses invernales.

GEOMORFOLOGÍA

El origen de las cubetas como la aquí analizada es diverso y casi nunca los procesos son únicos, sino que muchas veces se reconoce la superposición de dos o más acciones geomorfológicas. No obstante, es posible señalar que el proceso dominante es esencialmente deflacionario, con menor frecuencia la génesis esta ligada a cauces fluviales preexistentes. Esta morfología, que controla los procesos hidrológicos, es heredada de un clima diferente al actual, donde ha dominado un ambiente desértico (Dangavs, 1998).

SUELOS

Los suelos en el sector de la laguna “El Cuco” corresponden al orden molisoles, suborden acuol, gran grupo natracuol y subgrupo natracuol típico. Adquieren significación desde el punto de vista hidrológico el suborden y gran grupo, por ser indicadores de una afectación por un nivel freático elevado con aguas de alto contenido sódico. Otra característica significativa es la presencia de tosca a reducida profundidad (entre 0,5 y 1 m), es decir, los suelos se apoyan sobre este horizonte petrocálcico (Moscatelli y Scoppa, 1983). Esto constituye un impedimento físico para la penetración del agua y da lugar a una muy rápida saturación y, en épocas estivales, a una pronta desecación por aislamiento de la humedad profunda. Esto es acentuado por la presencia de un horizonte B con elevado contenido de sodio (mayor que el 40 %) que constituye un impedimento más al pasaje de agua. Pueden escapar a esta última característica los cordones de origen eólico. Resumiendo, desde el punto de vista hidrológico son mal drenados y con alcalinidad sódica no salina (INTA, 1974), resultando en una baja permeabilidad vertical.

GEOLOGÍA

El basamento hidrogeológico se encuentra en la zona de la laguna El Cuco a una profundidad aproximada de 250 m. Sobre él se disponen los sedimentos de la Formación Pampeano (Fidalgo, 1975). El Pampeano se compone de arenas limosas a limos arenosos con cantidades subordinadas de arcilla de origen eólico. Comúnmente se los ha denominado loess o limos loessoides. En general presentan aspecto masivo, aunque localmente pueden mostrar una ligera estratificación. Su compactación es algo pronunciada y casi siempre mayor que en los loess mundialmente conocidos, aumentando en zonas donde se hace presente el carbonato de calcio con aspecto estratiforme de diferentes espesores, desde algunos centímetros hasta varios metros (Fidalgo, 1983).

Sobre el Pampeano se disponen los sedimentos del Post-Pampeano que aflora a manera de manto continuo en casi toda el área de estudio. Está constituido por sedimentos de origen eólico (arenas limosas a limos arenosos) y otros depósitos de origen fluvial y lacustre.

METODOLOGÍA

Para conocer el funcionamiento hidrológico de la laguna y su entorno se ha instalado instrumental para el registro continuo de las variaciones de los niveles en el cuerpo de

agua y en el acuífero en su entorno. Además, se cuenta con piezómetros de muy poca profundidad para controlar el nivel freático bajo la laguna y en sus alrededores, los que se miden periódicamente. También se controlan la precipitación y su intensidad en una estación instalada en las cercanías.

A 40 m del borde de la laguna se ha instalado un registrador digital que mide variaciones al cm en intervalos horarios en una perforación de 6 m de profundidad. Siguiendo una línea perpendicular a la orilla del cuerpo de agua se ubicaron tres piezómetros entre la perforación mencionada y la laguna, para definir con precisión el perfil del nivel freático en la zona de influencia del cuerpo de agua. Estos piezómetros tienen una profundidad promedio de 2.10 m. Se cuenta con un piezómetro adicional alineado con las anteriores pero a 100 m del cuerpo de agua, para medir el nivel freático con una influencia mínima del nivel de la laguna.

Los niveles en la laguna se registran mediante un limnógrafo digital con lecturas horarias al centímetro. Para controlar los registros del limnógrafo se instalaron dos regletas de 1 m con lecturas al cm para abarcar la totalidad del rango de niveles posibles.

La medida directa del flujo de agua hacia o desde la laguna en puntos discretos se realizó por medio de infiltrómetros, conocidos como “seepage meters” en la literatura anglosajona. Este dispositivo consiste en cubrir un área del fondo de la laguna con un recipiente con el fondo abierto y luego medir el tiempo y cambio de volumen de agua en una bolsa plástica conectada a dicho recipiente (Lee, 1977; Lee y Cherry, 1978; Carrera Ramírez, 1997). También se instaló un piezómetro dentro de la laguna, en una zona cercana a los infiltrómetros, que controla el nivel piezométrico a aproximadamente 1 m por debajo del fondo de la laguna y, por lo tanto, permite medir el gradiente hidráulico en la capa de sedimentos del fondo de la laguna.

Todos los piezómetros y regletas fueron vinculados altimétricamente por medio de una nivelación mediante instrumental óptico.

No se pudo controlar el caudal ingresante a la laguna debido a la importante influencia que ejerce el nivel de la misma en los caudales, por lo que no existe una relación unívoca entre caudales y alturas en el cauce.

También se han tomado muestras de la laguna y del agua subterránea para la realización de análisis químicos completos en los momentos en que se controlan los niveles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 puede verse el registro de niveles en la laguna y en el piezómetro para los años 1998 y 1999. Todos los niveles están referidos al mismo sistema de referencia arbitrario, que está 450 cm por debajo del punto más bajo del fondo de la laguna. Puede observarse que los niveles de la laguna están casi continuamente por encima del nivel freático. Esto es especialmente notable en los meses de verano, en los cuales los niveles permanecen relativamente bajos debido al predominio de la evapotranspiración sobre las precipitaciones. Desde octubre de 1998 a marzo de 1999 se registró un prolongado período en el que el descenso del nivel freático es notablemente mayor que las aguas de la laguna. Es fácilmente advertible que el exponente de la curva de agotamiento de las aguas subterráneas es mayor que el de las aguas superficiales.

En febrero y marzo de 1998, y en marzo de 1999 se registraron importantes precipitaciones que provocaron los eventos de recarga más importantes del período analizado. En efecto, el nivel freático registra en esos momentos ascensos bruscos y de importante magnitud, llegando a superar el nivel de la laguna, que también asciende pero menos que el agua subterránea ya que alcanza su cota de descarga. Existe una alta probabilidad de que estos importantes eventos de recarga se produzcan desde febrero a abril.

Durante ambos inviernos, los niveles se mantienen altos y muy cercanos. Las fluctuaciones de nivel son leves, merced a las bajas precipitaciones y la pequeña magnitud de la evapotranspiración. Sin embargo, al estar el nivel freático muy cercano a la superficie del terreno, esas precipitaciones producen ascensos de nivel que superan frecuentemente al nivel de la laguna, que rápidamente alcanza su nivel de rebalse. Este escenario se produce en los inviernos que suceden a importantes eventos de recarga en el otoño, por lo que los niveles permanecen altos. Pero, aunque no es el caso de los dos años mostrados, existen ocasiones en que se ingresa al invierno con niveles bajos y, en ese caso, los niveles de la laguna muestran un importante desnivel con las aguas subterráneas.

En la Figura 4 se ha ampliado el registro de un período durante el invierno del año 1998. El nivel freático supera a la laguna varias oportunidades debido a precipitaciones

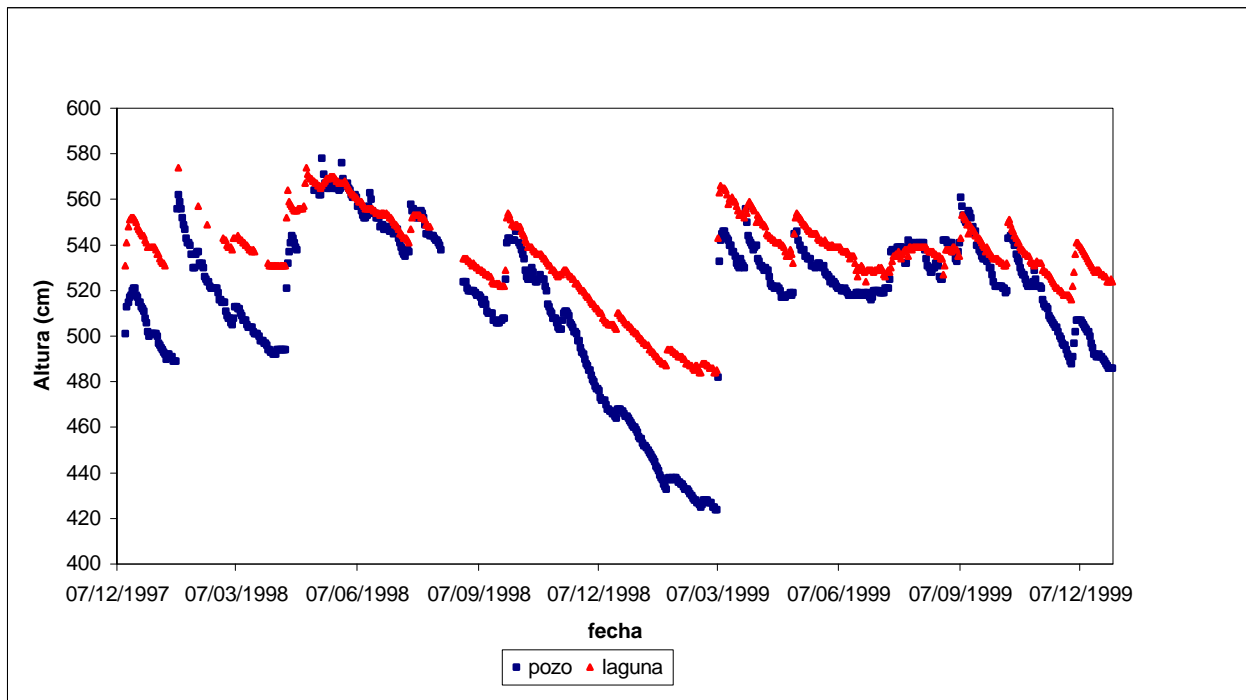


Figura 3. Variación de nivel en la laguna y el acuífero para el período 1998-99.



Figura 4. Detalle de variación para un período en que el nivel freático supera a la laguna.

que no se muestran en el gráfico. Es significativo el comportamiento del nivel freático, con ascensos y descensos muy rápidos comparados con las fluctuaciones de la laguna.

En los períodos en que no llueve, se produce el descenso de los niveles tanto en la laguna como en el agua subterránea. Si se vuelcan los niveles registrados en estos períodos en un gráfico en el que las ordenadas son los niveles y las abscisas el tiempo se obtiene una curva denominada curva de agotamiento o recesión de la laguna o de las aguas subterráneas, según sea el caso. Esta curva responde a una ecuación de tipo exponencial (Custodio y Llamas, 1983). Si para el eje de ordenadas se utiliza una escala logarítmica esta curva pasa a ser una recta cuya pendiente es el coeficiente del tiempo en el exponente de la ecuación exponencial, comúnmente denominado λ y ha sido determinada para la laguna y el piezómetro para varios períodos y ha mostrado ser notablemente estable. El coeficiente obtenido para la laguna es 0,0006 y para el pozo 0,001. Esto significa que, como ha sido dicho antes, los descensos son más rápidos para el nivel freático que para la laguna.

El piezómetro ubicado dentro de la laguna fue observado en diez oportunidades durante 1999, habiéndose obtenido un desnivel medio de 13 cm por debajo del pelo de agua de la laguna. El piezómetro externo registraba en esos momentos un nivel medio inferior en 16 cm a la laguna.

Se midió en varias oportunidades un medidor de infiltración ubicado a aproximadamente 20 m del borde. Se obtuvieron flujos salientes de la laguna de 0.06 mm/día para un período de 38 días, de 0.04 mm/día para un período de 4 días y de 0.09 mm/día para 21 días con diferencias de nivel entre la laguna y el piezómetro de 16, 59 y 13 cm, respectivamente. Suponiendo representativos los valores como flujo medio a través de la totalidad del fondo, se obtendrían pasajes de agua desde toda la laguna al medio subterráneo de entre 1,2, 1,8 y 2,7 m³/día, respectivamente.

Dado que el sedimento depositado en el fondo de la laguna alcanza un espesor aproximado de 0,30 m en las cercanías del piezómetro, tomando un desnivel de 11 cm entre los niveles hidráulicos por encima y debajo y adoptando un flujo medio, medido mediante el infiltrómetro, de 0.06 mm/día se obtiene mediante la aplicación de la ley de Darcy una conductividad hidráulica del material del fondo de la laguna de $1,6 \cdot 10^{-4}$ m/día.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de 7 análisis químicos completos de las aguas de la laguna, mientras que en la Tabla 2 se muestran los datos correspondientes al acuífero. Los resultados obtenidos indican un menor contenido salino en las aguas

N=7	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	F	CE	pH
Media	10.6	6.9	74.5	7.9	28.1	14.6	13.5	188.5	0.24	405	7.5
D.E.	7.1	4.1	25.7	1.4	10.3	7.6	7.7	58.0	0.20	134	0.4

Tabla 1. Contenidos iónicos medios y desviación estándar (D.E.) para el agua de la laguna. Todos los valores en ppm, excepto la conductividad eléctrica (CE) en μS y el pH.

n=4	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	F	CE	pH
Media	42.6	21.1	97.5	9.7	29.8	14.7	12.5	422.8	0.74	805	7.4
D.E.	20.6	1.3	39.5	1.0	3.3	5.8	3.9	37.7	0.47	44	0.0

Tabla 2. Contenidos iónicos medios y desviación estándar (D.E.) para el agua del acuífero. Todos los valores en ppm, excepto la conductividad eléctrica (CE) en μS y el pH.

superficiales, lo que era de esperar dado que predomina el flujo desde el cuerpo de agua al acuífero. Por otra parte, y por las mismas razones recién expresadas, debería esperarse un efecto de dilución en el agua extraída del piezómetro que no puede comprobarse dado que no se cuenta con muestras de perforaciones cercanas no influenciadas por el cuerpo de agua. De todas maneras, el agua del pozo es claramente bicarbonatada sódica.

CONCLUSIONES

Los niveles en la laguna están casi la totalidad del tiempo por encima del nivel freático en el sector analizado, lo que ha sido comprobado por medio de dos piezómetros: uno inmediatamente por debajo del fondo del cuerpo de agua y el otro distante 40 m del borde. La diferencia de energía hidráulica entre la laguna y las aguas subterráneas inmediatamente debajo de ella se produce por una capa de sedimentos arcillosos de una permeabilidad muy baja. El nivel freático supera el nivel del cuerpo de agua solamente en los momentos en que este está descargando sus aguas, y este desnivel dura un corto lapso, ya que el descenso de las aguas subterráneas es muy rápido.

El infiltrómetro confirmó el flujo desde la laguna al medio subterráneo, pero mostró tasas de infiltración muy bajas que se deben al material del lecho, de características arcillosas. Un cálculo preliminar arroja un valor de conductividad hidráulica de $1,6 \cdot 10^{-4}$ m/día para este material.

El análisis de las curvas de recesión en la laguna y el piezómetro indica que los descensos de nivel son más rápidos en las aguas subterráneas que en la laguna.

La hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas se muestra acorde con el hecho de que la mayor parte del tiempo la laguna recarga el acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

- Carrera Ramírez, J., 1997. Observación y medida de la recarga (descarga) a partir de aguas superficiales y conducciones, transferencias y fugas. En: Custodio, E., Llamas, M.R., y Samper, J. (Ed.), La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica: 229-245.
- Custodio, E. y M.R. Llamas., 1983. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona.
- Dangavs, N., 1998. Los ambientes lénticos de la Pampasia Bonaerense, República Argentina. En: Fernández Cirelli, A. (Ed.) Agua: Problemática Regional, 145-150.
- Fidalgo, F., R. Pascual y F. De Francesco, 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense (Argentina). Relatorio IV Congreso Geológico Argentino: 103-138.
- Fidalgo, F., 1983. Algunas características de los sedimentos superficiales en la cuenca del salado y en la pampa ondulada. Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras, Actas II: 1045-1057.
- INTA, 1974. Carta de suelos de la República Argentina, Hoja 3760-10 Cacharí.
- Kovacs, G., 1983. General principles of flat-land hydrology. En: Fuschini Mejía (Ed.), Hydrology on large flatlands: 298-355.
- Kruse, E., 1992. Estimación de escurrimientos subterráneos en la cuenca del arroyo del Azul (Buenos Aires). CIC, Año II, No. 15: 3-12.
- Lee, D.R., 1977. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. Limnology and Oceanography, 22: 140-147.
- Lee, D.R. y J.A. Cherry, 1978. A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers. Journal of Geological Education, 27: 6-10.
- Moscattelli, G. y C. Scoppa, 1983. Características hidroedáficas de la pampa deprimida. Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras, Actas II: 1071-1088.
- Nagy, M.I. y M.P. Auge, 1992. Relación entre el flujo vertical y lateral de agua subterránea. Cuenca del arroyo del Azul. Provincia de Buenos Aires. III Jornadas Geológicas Bonaerenses, Actas: 165-170.
- Ringuelet, R., 1962. Ecología acuática continental, EUDEBA, 137 p., Buenos Aires.

- Sala, J. M., E. Kruse y R. Aguglino, 1987. Investigación hidrológica de la cuenca del arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. Informe 37, CIC, 235 p., La Plata.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate Geol. Review, 38: 55-94.
- Thornthwaite, C.W. y J.R. Mather, 1957. Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 10, 3: 185-311.
- Varni, M. y E. Usunoff, 1999. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. Hydrogeology Journal, 7: 180-187.