
**Relación arroyo-acuífero en un sistema hídrico afectado por explotación
antrópica**

Rosario Soledad Barranquero¹, Marcelo Varni², Alejandro Ruiz de Galarreta³

¹Becaria CONICET. Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (CINEA).
Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de
Buenos Aires

²Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Universidad Nacional del Centro de la
Provincia de Buenos Aires

³CINEA.

Campus Universitario Tandil, Boxes de investigación II. Paraje Arroyo Seco s/n. 7000,
Tandil, Buenos Aires

rosariobarranquero@yahoo.com.ar

Barranquero, R. S., Varni, M. & Ruiz de Galarreta, A. (2015). Relación arroyo-acuífero en un sistema hídrico afectado por explotación antrópica. *Revista Estudios Ambientales*, 3 (2), 30-51.

Recibido: 27 de octubre de 2015

Publicado: 30 de diciembre de 2015

RESUMEN

El área de estudio del presente trabajo es la cuenca del arroyo Langueyú, en la cual el recurso hídrico subterráneo constituye la fuente de agua para la ciudad de Tandil y su espacio periurbano y rural. La cuenca tiene sus nacientes en el sistema serrano de Tandilia y se desarrolla en sentido NE, hacia la cuenca del río Salado. La ciudad de Tandil se encuentra atravesada por el curso del arroyo Langueyú y sus afluentes, siendo el primero utilizado como sumidero de efluentes pluviales, cloacales, previo tratamiento, e industriales. Por otra parte, estudios antecedentes probaron que la explotación del recurso para el suministro de agua de red ha provocado alteraciones en la hidrodinámica natural del acuífero, especialmente por la disposición concentrada de las perforaciones más antiguas, que además se ubican en cercanías al sector de descargas de efluentes al arroyo. Considerando este contexto se planteó como objetivo del trabajo realizar un análisis de la relación arroyo-acuífero en el sector de mayor alteración antrópica y evaluar la importancia de los resultados respecto a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca. Para ello, en el sector de mayor afectación, se midieron los niveles del agua subterránea (en pozos particulares) y del pelo de agua del arroyo, en noviembre de 2013 y marzo de 2014. Se evaluó además la importancia de la relación arroyo-acuífero respecto a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca. Se comprobó la inversión de la relación natural arroyo-acuífero en el área estudiada, generando un carácter influente del arroyo respecto al acuífero. También se vio modificado el aporte de caudal subterráneo entre los distintos sectores geomorfológicos de la cuenca. El riesgo de contaminación del medio subterráneo que implica esta situación, plantea la necesidad de llevar adelante un estudio en profundidad y un monitoreo para definir con precisión las características de ese riesgo.

Palabras clave: agua superficial, agua subterránea, explotación antrópica, riesgo de contaminación, gestión de los recursos hídricos.

ABSTRACT

The study area of this work is the Langueyú creek basin, in which groundwater is the water resource for Tandil city and its peri-urban and rural areas. The basin has its headwaters in the Tandilia hills system and develops in NE direction, towards the Salado river basin. The Tandil city is crossed by the Langueyú creek and its tributaries,

the first being used as storm drain, sewer, pretreatment, and industrial effluents. Moreover, background studies proved that the resource exploitation for water supply has modified the natural hydrodynamics of the aquifer, especially in the effluents discharge sector due to the concentrated disposition of the oldest wells. Considering this context, the work objective was analyzing the creek-aquifer relationship in the higher anthropogenic disturbance sector and assessing the importance of the results regarding the water resources management in the basin. Groundwater (in private wells) and creek water levels were measured in November 2013 and March 2014. Also the importance of creek-aquifer relationship regarding to the water resources in the basin was evaluated. An inversion of natural creek-aquifer relationship was found, being the creek influent regarding to the aquifer. Also the contribution of groundwater flow between the geomorphological sectors of the basin was modified. Due to the contamination risk of groundwater involving in this situation is necessary do a deep study and monitoring to define with precision the characteristics of this risk.

Keywords: surface water, groundwater, anthropic exploitation, pollution risk, water resources management.

INTRODUCCIÓN

La importancia ecológica e hidrológica de las relaciones entre el agua superficial y los acuíferos ha sido reconocida desde los inicios de la hidrogeología (Custodio y Llamas, 1983). Muchos científicos han estudiado cómo la dinámica de uno de los medios puede afectar al otro y de qué manera se comprende esta vinculación en relación al manejo de los recursos hídricos (Sophocleous, 2002; Kalbus *et al.*, 2006; Cox *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008; Sanz *et al.*, 2011; González-Pinzón *et al.*, 2015). Es importante resaltar que lo mencionado anteriormente ha dado origen a una joven disciplina, la hidroecología, que estudia las interacciones entre el ciclo hidrológico y los ecosistemas a distintas escalas espacio-temporales (Rodríguez-Iturbe y Porporato, 2004).

En líneas generales puede decirse que la existencia de intercambio y su dirección dependen de los niveles en el río y el acuífero, mientras que el volumen está vinculado a la permeabilidad de los materiales. Pero más allá de la determinación del intercambio en sí mismo, resulta fundamental la evaluación integral de la relación y el comportamiento de ambos medios (superficial y subterráneo) en el contexto de la actividad antrópica, considerando que la complejidad del sistema solo puede comprenderse a través de la visión ambiental a nivel de cuenca (Dourojeanni *et al.*, 2002).

Dada la presión creciente de las actividades antrópicas sobre el sistema hídrico a nivel mundial en los últimos años se han multiplicado los estudios que analizan específicamente la influencia en la hidrodinámica y/o hidroquímica de las aguas subterráneas en las superficiales y viceversa (Eglin *et al.*, 1997; Brunke y Gonser, 1997; Li *et al.*, 2008; Strauch *et al.*, 2008; Sanz *et al.*, 2011; Sánchez-Martos *et al.*, 2012).

El área de estudio del presente trabajo es la cuenca del arroyo Langueyú ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, una de las principales zonas de producción agropecuaria de la República Argentina. En la cuenca se asienta la ciudad de Tandil, con 123.871 habitantes (INDEC, 2010), cuya fuente de agua es el recurso hídrico subterráneo, utilizado tanto para el consumo como para el desarrollo de diversas actividades socioeconómicas.

Históricamente la ciudad, y su espacio adyacente periurbano y rural, se han abastecido de agua utilizando dicho recurso subterráneo, constituido por un acuífero freático multiunitario (Sala *et al.*, 1987). En tanto, respecto al servicio de desagües la

ciudad cuenta con un sistema de red cloacal separada de la red de desagües pluviales. Los efluentes pluviales, sin tratamiento previo, y los cloacales, luego de su procesamiento en plantas destinadas a este fin, son volcados en distintos tramos del arroyo Langueyú ubicado al Norte de la ciudad. El arroyo, que antiguamente funcionó como un espacio de uso recreativo para la población de Tandil, recibe además de los efluentes del saneamiento básico, las descargas de industrias viendo afectada su calidad (Banda Noriega *et al.*, 2010; Ruiz de Galarreta *et al.*, 2013).

Por otra parte, hay estudios antecedentes que han comprobado que la explotación del recurso para el suministro de agua de red a la ciudad de Tandil provoca alteraciones en la hidrodinámica natural del acuífero. Esto se debe principalmente a la disposición concentrada de las perforaciones más antiguas utilizadas para suministro de agua de red, que además se ubican en cercanías al sector de descargas de efluentes al arroyo (Barranquero *et al.*, 2006; Barranquero *et al.*, 2008).

Teniendo en cuenta el uso del arroyo como sumidero de efluentes y la alteración hidrodinámica del acuífero por explotación, se considera importante evaluar la dinámica existente entre el medio superficial y subterráneo. Por ello se plantea como objetivo del presente trabajo realizar un análisis de la relación arroyo-acuífero en el sector de mayor alteración antrópica y evaluar la importancia de los resultados respecto a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca.

Área de estudio

La cuenca del arroyo Langueyú posee una extensión aproximada de 600 km² y se ubica en el partido de Tandil (Figura 1). Sus nacientes se localizan en las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires también llamadas simplemente Tandilia, que ocupan la región centro-sudeste de aquella.

El sistema serrano Tandilia emerge en forma de arco en la Pampa Húmeda a manera de columna vertebral en sentido NO-SE. Posee una extensión de 300 km, un ancho variable que se hace mayor en la parte central (zona de la ciudad de Tandil) y está constituido por sierras, cerros, cerrilladas y lomas de baja altura, en general inferior a los 500 m, que sobresalen entre 50 y 250 m de la llanura pampeana.

Las Sierras de Tandil en relación a la zona de estudio constan, desde el punto de vista estratigráfico, de un zócalo de basamento cristalino de edad precámbrica formado principalmente por rocas de aspecto granítico y una cubierta sedimentaria cenozoica.

Esta cubierta está constituida mayormente por sedimentos limosos del plio-pleistoceno en el área Interserrana y Pedemontana; en tanto en las sierras la matriz puede describirse como una arenisca limo-arcillosa con proporciones variables de carbonato de calcio (Teruggi y Kilmurray, 1975; Fidalgo et al., 1975).

El basamento cristalino descrito se encuentra aflorando en el sector serrano y se profundiza de SO-NE, en el sentido de escurrimiento (superficial y subterráneo) de la cuenca. Esto determina la presencia de dos medios hidrogeológicos: uno fisurado en el material rocoso, con porosidad y permeabilidad secundarias que determinan un bajo rendimiento del acuífero, y, uno poroso clástico en la cubierta sedimentaria, de permeabilidad primaria y flujo laminar, que constituye el acuífero mayormente explotado en la cuenca.

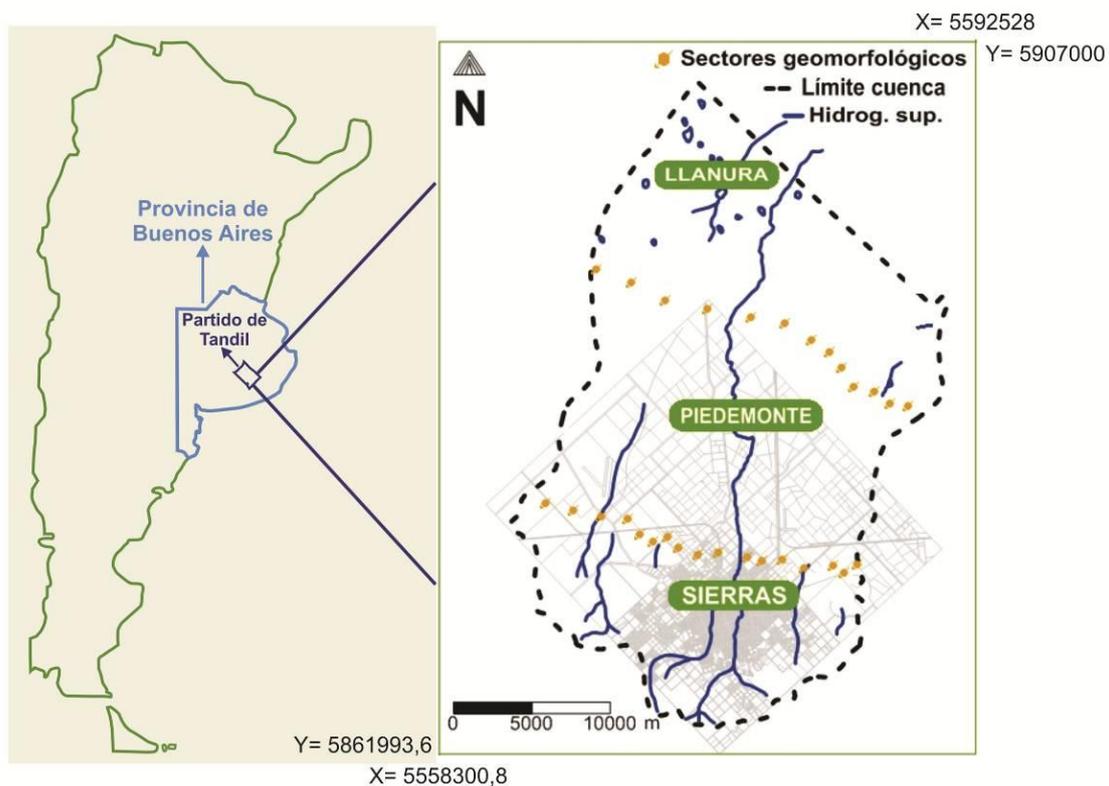


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Languelyú. Fuente: Barranquero, 2015.

Desde el punto de vista geomorfológico la cuenca puede dividirse en tres unidades principales:

- Sector de sierras: caracterizado por la presencia de sierras, cerros aislados y valles, relacionados estos con la existencia de bloques elevados por fallas directas. Dentro de este sector pueden considerarse dos subunidades: una de relieve escarpado, con rocas aflorantes apenas cubiertas por un delgado manto de loess, y la de relieve ondulado, con loess de hasta dos metros de espesor. El sector de sierras se caracteriza además por encontrarse en él las pendientes más altas y por hallarse los valles de los cursos de agua bien definidos.

- Sector de Piedemonte: el mismo se localiza en forma continua al primer sector, tiene ángulos de pendiente más suaves que éste último y puede observarse allí la presencia de bloques de gran tamaño y conos aluviales. Presenta una red de drenaje bien definida y de diseño distributivo.

- Sector de llanura: se caracteriza por la presencia de pendientes muy suaves. Los materiales que lo forman fueron en principio eólicos y sufrieron posteriormente un transporte y redepositación (procesos característicos del sector) por parte de aguas mantiformes provenientes de las sierras. El drenaje poco definido y pobremente integrado muestra cauces estrechos y cursos temporarios, los cuales a menudo se pierden en suaves depresiones.

Respecto al clima Ruiz de Galarreta y Banda Noriega (2005), considerando los balances climáticos de Thornthwaite y Mather (1957), concluyeron que puede ser tipificado como subhúmedo-húmedo, mesotermal, con un déficit de agua poco significativo y veranos frescos, para el período 1900-2000. Sin embargo, analizando datos de los últimos 30 años, se podría tipificar como de tipo climático húmedo, con igual eficiencia térmica e índice de concentración estival.

El arroyo Languayú nace en las Sierras de Tandil producto del aporte de pequeñas cuencas intraserranas de arroyos de régimen torrencial, ubicadas inmediatamente al S de la ciudad de Tandil. El arroyo posee obras de regulación, la más importante de ellas es el Dique del Fuerte al S de la ciudad, construido en el año 1957. Sus principales afluentes son el arroyo Blanco, cuyo recorrido se extiende de la zona S y O de la ciudad hacia el NO de la misma, y el arroyo del Fuerte, que atraviesa el ejido urbano por su sector E hasta cercanías de la Ruta 226 donde confluye con el arroyo Blanco. Ambos cursos se hallan entubados en su tránsito por la ciudad. Su confluencia al N de la misma, nuevamente a cielo abierto, origina el arroyo Languayú. El mismo en el

recorrido de su cauce gira luego hacia el E para recibir más adelante los aportes del arroyo El Perdido, confluencia denominada canal N° 1 (Bernabé, 2004).

METODOLOGÍA

Como se explicara en la introducción, este trabajo centra el análisis de la relación arroyo-acuífero en el sector en el cual se ha detectado mayor afectación del sistema hídrico por la explotación del recurso subterráneo para suministro de agua y la utilización del arroyo Langueyú como sumidero de efluentes.

Se consideraron en primer lugar las caracterizaciones hidrogeológicas regionales que permiten tener una primera aproximación en todo el ámbito de la cuenca. Se tuvo en cuenta además el trabajo de Díaz y Ruiz de Galarreta (2010) en el que se evalúa la relación puntualmente en un área distal de la cuenca.

Específicamente, para el análisis en el sector de mayor afectación, se relevó la existencia de pozos particulares de extracción de agua subterránea a ambos márgenes del arroyo Langueyú en el sector de mayor concentración de perforaciones de Obras Sanitarias Tandil (OST) para suministro de agua de red (Figura 2). Cabe destacar que toda esta zona ya cuenta con este servicio, por lo cual no fue fácil hallar perforaciones particulares que aún se conservaran abiertas y en las que se pudiera medir la profundidad del nivel de agua.

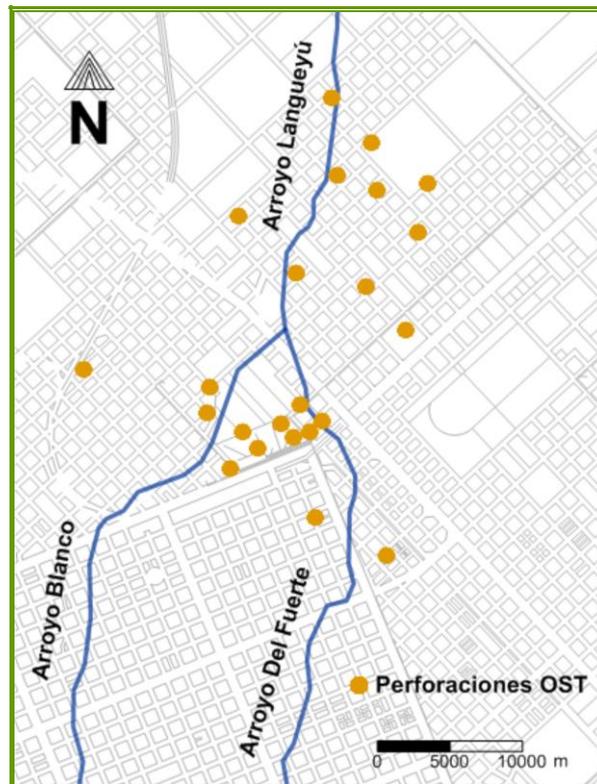


Figura 2. Perforaciones para suministro de agua de red de OST cercanas al arroyo Languayú.
Fuente: Barranquero, 2015.

Se consideraron además datos de nivel medidos en pozos utilizados para el suministro de agua de red antes de su puesta en funcionamiento por OST, calculando, a partir de los datos de eficiencia provistos por el ente, el nivel dinámico de dichas perforaciones. Tanto las perforaciones como el pelo de agua del arroyo fueron acotados utilizando un nivel óptico. Los niveles del agua subterránea y del arroyo se midieron en noviembre de 2013 y en marzo de 2014. Con estos datos se dibujaron perfiles y se analizaron las diferencias entre un momento de consumo de agua normal y un momento posterior a la mayor demanda de los meses de diciembre, enero y febrero. La Figura 3 muestra la totalidad de los puntos con dato de nivel con los que se contó para el análisis. Los puntos sin la sigla OST son pozos domiciliarios particulares.



Figura 3. Puntos con dato de nivel para el análisis de la relación acuífero. Fuente: Barranquero, 2015.

También se analizaron los balances de agua en los distintos sectores geomorfológicos de la cuenca, a partir de la simulación del flujo subterráneo en estado estacionario que se realizó utilizando el programa de modelación matemática Modflow-2000 (Harbaugh *et al.*, 2000) durante el trabajo de tesis doctoral de la primera autora (Barranquero, 2015). Dichos balances representan otra fuente de información de la relación arroyo-acuífero, ya que dan cuenta de los montos de ingresos al acuífero y egresos o salidas del mismo.

Una vez caracterizada la relación arroyo-acuífero se evaluó su importancia respecto a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca, es decir no solo teniendo en cuenta dicha relación y otras características del medio físico-natural sino también el uso antrópico de los medios superficial y subterráneo. Es el propósito del trabajo que sus conclusiones representen un insumo para los tomadores de decisión a cargo de la gestión de los recursos hídricos, así como para la población en general que también debería ser involucrada en dicha gestión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación arroyo-acuífero a nivel regional

Si bien Ruiz de Galarreta *et al.* (2007) en una caracterización hidrogeológica preliminar de la cuenca del arroyo Langueyú señalan que en el sector de sierras las aguas subterráneas son influentes respecto a los tributarios Del Fuerte y Blanco, en un trabajo más profundo realizado en la cuenca del arroyo Tandileofú Ruiz de Galarreta (2006) indica que "...se ha corroborado el carácter influente de las aguas subterráneas donde el curso principal y afluentes presentan un régimen perenne, siendo de carácter inverso el de los cursos efímeros en zonas de divisorias..." (pág. 78).

En la cuenca del arroyo Langueyú, Ruiz de Galarreta *et al.* (2007) señalan que en el sector de piedemonte el acuífero es mayormente influente respecto al arroyo pero la relación podría hallarse alterada en algunos sectores por la explotación del recurso; hacia el área de llanura el acuífero y el arroyo Langueyú presentan un intercambio de baja magnitud y por lo tanto la zona de acuífero afectada en ambas márgenes sería estrecha.

Díaz y Ruiz de Galarreta (2010) estudiaron la relación acuífero-arroyo en las inmediaciones del paraje rural De La Canal que se encuentra en el sector Centro-Norte de la cuenca. El estudio se realizó en un momento de déficit importante en el balance hídrico respecto al balance modular del período 1900-2000 (Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2005). Si bien en el primer semestre (otoño-invierno) observaron que el acuífero era influente respecto al arroyo, y en el segundo semestre (primavera-verano) la relación se invirtió, en ambos casos dicha relación fue de baja magnitud y acotada a pocos metros de las márgenes del arroyo. Los autores destacan que el comportamiento influente del arroyo puede estar producido por los aportes al curso aguas arriba, por descargas de efluentes de industrias y domiciliarios.

Relación arroyo-acuífero en el sector de mayor afectación

Como se detallara en la metodología, se midieron los niveles en perforaciones y en el pelo de agua del arroyo Langueyú en diciembre de 2013 y marzo de 2014 con el propósito de evaluar las variaciones producto de la mayor demanda de agua de red en los meses de verano (principalmente enero y febrero).

En todos los casos los niveles del agua subterránea en diciembre de 2013 se hallaron por debajo del pelo de agua del arroyo entre 12,5 m (para la perforación 1) y un

mínimo de 5,7 m para la 2. Esto obviamente señala que el arroyo estaría aportándole agua al acuífero en este sector de la cuenca. En la Figura 4 se muestran los niveles relativos del agua subterránea respecto al arroyo; junto a las líneas en celeste, que unen los pozos de observación con una perpendicular al curso, se ha escrito la diferencia de nivel del agua subterránea en el pozo respecto al pelo de agua del curso. En marzo de 2014 se constata que la relación continúa siendo de influencia del arroyo respecto al acuífero con un tenor levemente mayor, ya que la diferencia acuífero-arroyo aumenta entre 0,1 y 0,3 m.

Por último, es importante destacar que se realizó el balance hídrico en los años 2013 y 2014, siendo ambos similares al balance modular en cuanto a la distribución estacional de las precipitaciones y los momentos de excesos y déficit; solamente en el caso de los meses de enero y febrero de 2014 la cantidad de precipitación fue marcadamente superior al monto en esos mismos meses en el balance modular.

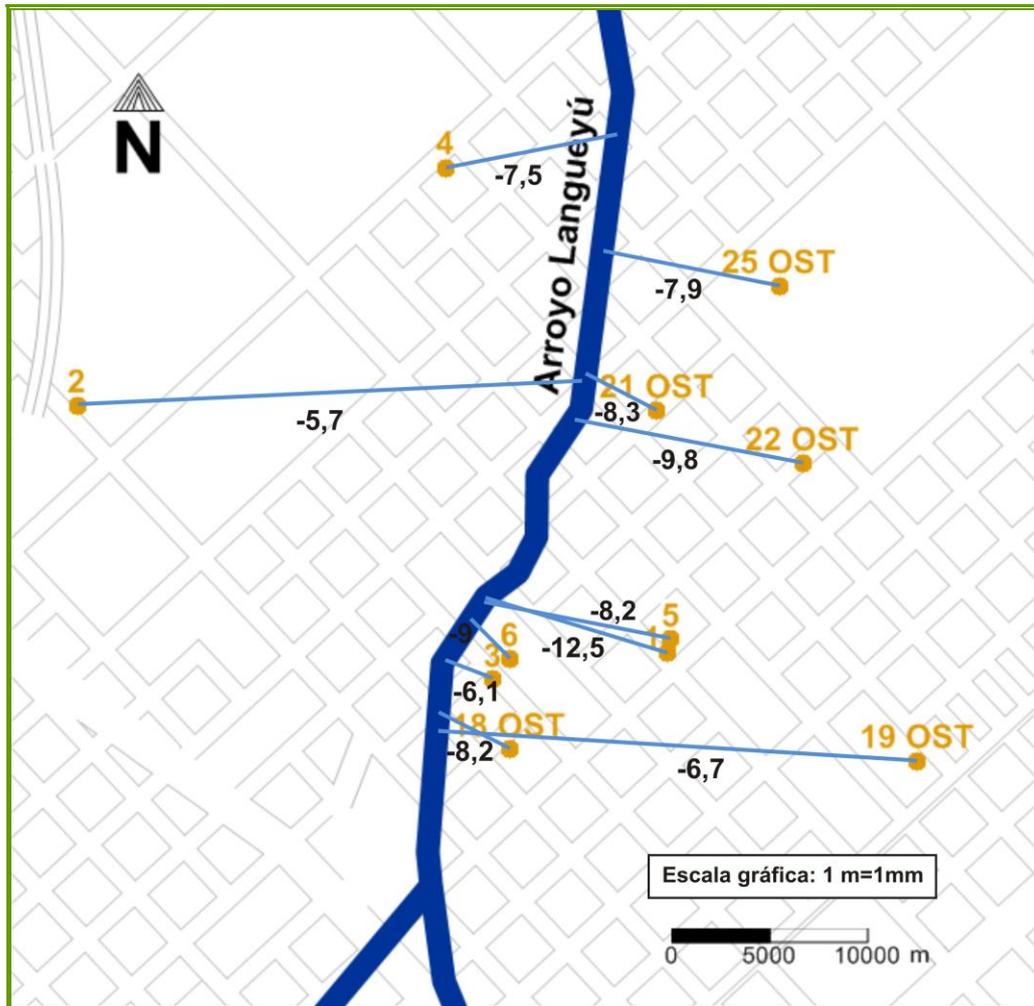


Figura 4. Representación de niveles relativos acuífero-arroyo para diciembre de 2013. Fuente: Barranquero, 2015.

Balances de agua en los distintos sectores geomorfológicos

En la Figura 5 se muestra el balance de agua para el sector sierras, en él se distingue la recarga como el componente con la mayor tasa ($94.495 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$), que equivale a 56 % de la recarga existente en la totalidad de la cuenca.

En tanto la mayor salida corresponde al aporte de esta zona a la 2 (sector de piedemonte) con un total de $79.577 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$; el otro egreso de $24.713 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ se debe a las perforaciones para suministro de agua de red.

En cuanto al componente referido al intercambio del acuífero con el arroyo (intercambio del río en la Figura 5) muestra que este último sería influente (perdedor) respecto al acuífero aportándole $9.794 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, lo que representa un 9,4 % de la entrada total al medio subterráneo. De acuerdo al modelo conceptual de

funcionamiento del sistema natural, los arroyos deberían ser influentes únicamente en las cabeceras, cambiando su régimen (ganador) en puntos más bajos donde los arroyos presentan régimen permanente. Se considera que la modelación matemática no se ajusta a la realidad en esta dinámica acuífero-arroyo tanto por los desequilibrios que produce la extracción de agua para suministro a la población, justamente en las cercanías del límite entre los sectores de sierras y piedemonte, como por las dificultades que mostró dicha modelación para simular correctamente el flujo subterráneo en el sector de sierras por la combinación de medios poroso y fisurado.

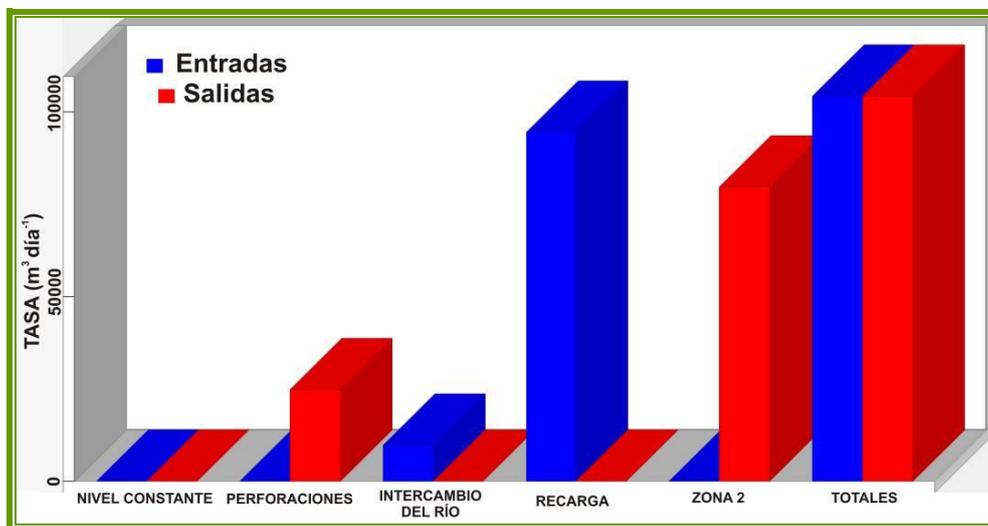


Figura 5. Balance de agua del sector de sierras. Fuente: Barranquero, 2015.

En la Figura 6 se consigna el balance para el sector de piedemonte en el cual la entrada principal general al sistema, la recarga, disminuye notablemente respecto al sector de sierras con una tasa de $49.034 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, es decir del 29 % del total a nivel de cuenca.

El caudal extraído por las perforaciones de OST es de $32.642 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, lo que equivale al 22,5 % del total de salidas del sector.

El intercambio entre el medio superficial y subterráneo es, a diferencia del sector de sierras, de mayor ganancia para el arroyo, al cual el acuífero le aporta $33.143 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$; no obstante el caudal en sentido inverso también es importante no solo por la cantidad ($16.200 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$) sino por la importancia para la gestión de los recursos hídricos que se comentan en el apartado siguiente.

La entrada desde la zona 1 obviamente tiene la misma tasa que la salida desde el sector de sierras hacia la zona 2, consignada en la Figura 5. Además el sector de piedemonte aporta a la zona 3 (llanura) un total de $79.025 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ que representa un 0,7 % menos que el aporte del sector de sierras al de piedemonte. Estos caudales salientes de los distintos sectores geomorfológicos presentan diferencias con los calculados en la tesis doctoral a partir de los mapas equipotenciales, sobre todo en el caso del sector de piedemonte, en el cual a través de los mapas equipotenciales se obtuvo un aumento respecto a la serranía, contrariamente a los resultados de la modelación matemática.

Con el propósito de explicar estas diferencias de caudal en el piedemonte se analizan en forma detallada las relaciones entre este sector y los otros dos respecto a los componentes del balance de agua. De acuerdo a la modelación matemática el caudal subterráneo inicial en el piedemonte es de $128.611 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ ($79.577 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ aportados por el sector de sierras y $49.034 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ de la recarga que alimenta al acuífero en el propio sector). De este total el piedemonte “entrega” al sector de llanura, representado en el balance de agua como salida hacia zona 3, $79.025 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, es decir que restarían $49.586 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$. De ellos $32.642 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ corresponden a la extracción por bombeo (que es importada al sector de sierras a través de la descarga de efluentes domiciliarios en el arroyo Langueyú) y resta un caudal de $16.944 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$. Este monto es similar al correspondiente al aporte del arroyo al acuífero ($16.200 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$). Puede concluirse por tanto que la explotación del acuífero en los sectores de sierras y piedemonte están produciendo una alteración no solo de la dinámica natural acuífero-arroyo sino también en los aportes de caudal subterráneo entre sectores geomorfológicos. Esto es particularmente claro para el piedemonte, el cual, si no tuviera la extracción por perforaciones, aportaría al sector de llanura un caudal subterráneo mucho mayor.

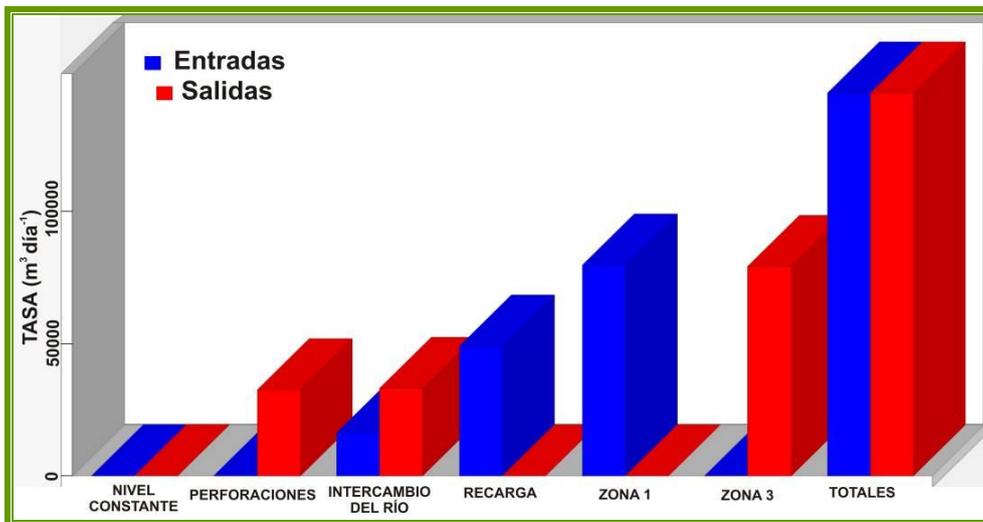


Figura 6. Balance de agua del sector de piedemonte. Fuente: Barranquero, 2015.

Por último, en la Figura 7, se muestra el balance para el sector de llanura que posee una entrada por recarga de $25.268 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, 15 % de la recarga total para la cuenca.

Obviamente la entrada desde la zona 2 equivale a la salida desde el sector de piedemonte hacia la zona 3 que se manifestaba en la Figura 6.

En tanto la principal salida es la representada por la condición de borde de nivel constante, que se refiere al nivel fijado en el modelo matemático para simular la salida de agua debido a escurrimiento subterráneo por el límite Norte de la cuenca, y equivale a $104.450 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$.

El intercambio acuífero-arroyo es de mucha menor magnitud que en los sectores de sierras y piedemonte. El acuífero es efluente ya que recibe desde el arroyo $523 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ y le aporta a éste $365 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$; este intercambio de agua no es de importancia respecto al movimiento de agua en la totalidad del sector ya que representa el 0,5 % de las entradas y el 0,35 % de las salidas. Además, como se mencionó con anterioridad, la influencia de este intercambio se restringe a las cercanías a las márgenes del arroyo.

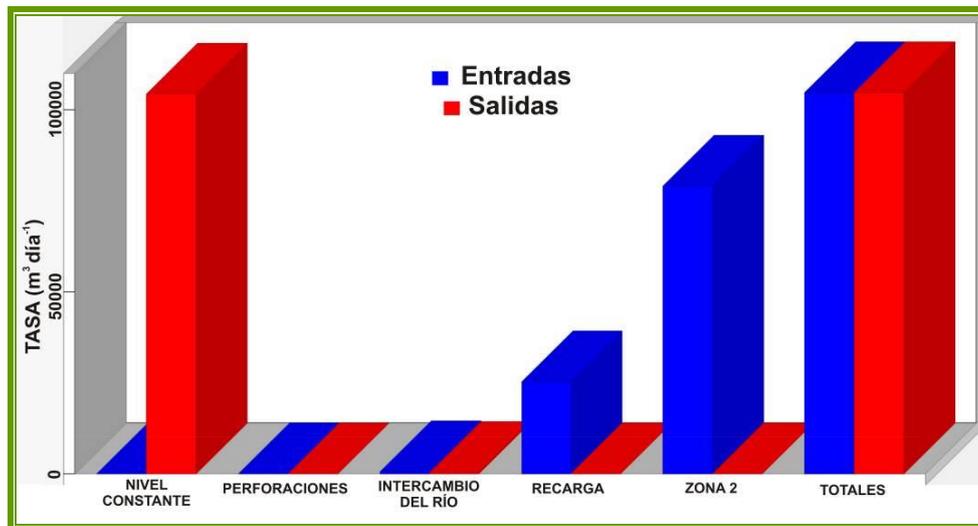


Figura 7. Balance de agua del sector de llanura. Fuente: Barranquero, 2015.

Importancia para la gestión de los recursos hídricos

El carácter evidentemente influente del arroyo respecto al acuífero en este sector, en el que se concentran gran cantidad de perforaciones de OST, implica que el aprovechamiento del recurso subterráneo para suministro de agua de red está provocando una clara alteración a la dinámica del sistema. La relación hallada en trabajos a nivel regional, de un acuífero influente respecto al arroyo en el piedemonte, está invertida en un área que ocupa al menos cuarta parte de dicho sector.

Dada esta condición de influencia del arroyo es importante contextualizar la situación de manejo de los efluentes industriales y cloacales de los cuales el arroyo es receptor.

A partir del crecimiento acelerado de la ciudad de Tandil, en los últimos 10 años, la planta depuradora de efluentes cloacales más antigua vio superada su capacidad de tratamiento; la situación se vuelve aún más crítica en los momentos de precipitaciones intensas cuando el gran caudal que llega a la planta, producto de las conexiones pluviales clandestinas, obliga a hacer un *by pass* para derivar el efluente “crudo” (sin tratamiento) directamente al arroyo (pocos metros aguas abajo de la confluencia de los arroyos Blanco y Del Fuerte).

En respuesta a la demanda creciente de la red cloacal en permanente expansión, en el año 2010 inició la actividad una nueva planta, ubicada en el sector Noroeste de la ciudad, en cercanías al arroyo Langueyú. Estas instalaciones cuentan con reactores de “lodos activados” para la degradación aeróbica de la materia orgánica, con una capacidad aproximada de tratamiento de efluentes de unos 15.000 habitantes (Ruiz de

Galarreta *et al.*, 2013). El efluente resultante del tratamiento es volcado al arroyo a la altura aproximada de la perforación denominada 25 OST en el análisis de niveles (ver Figura 4).

De acuerdo a un estudio del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS, 2009) la actividad productiva del área consta de 21 industrias, de las cuales la mayor parte pertenecen al rubro alimenticio, en segundo lugar talleres e industrias metal básicas, y se identificó una curtiembre que ha dejado de funcionar hace aproximadamente un año. Los muestreos y las inspecciones realizadas en ese momento permitieron al ente señalar que el funcionamiento de los tratamientos de estas industrias es deficiente en muchos casos y sus descargas aportan sedimentos y coliformes fecales al arroyo.

Teniendo en cuenta todas las actividades que se desarrollan en las márgenes del arroyo, y que hacen uso de él para la descarga de sus efluentes, la comprobación de su carácter influente es relevante para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca. Debe tenerse en cuenta al momento de evaluar qué actividades y bajo qué condiciones de generación de efluentes se permiten en las márgenes del arroyo y en sus alrededores; además se debe planificar un control y monitoreo permanente de los vuelcos al recurso hídrico superficial.

CONCLUSIONES

La relación acuífero-arroyo puede diferenciarse para los distintos ambientes geomorfológicos. En el sector de sierras los arroyos le aportan agua al acuífero en las cabeceras de la cuenca y la relación se invierte hacia las estribaciones serranas, asegurando esto el carácter permanente de dichos arroyos. En el piedemonte también se dan los dos tipos de relaciones, aunque el acuífero es mayormente influente, en el área de mayor concentración de perforaciones para suministro de agua de red el arroyo aporta agua al acuífero. Por último, en el sector de llanura, la relación acuífero-arroyo se vuelve de mucha menor magnitud, siendo el arroyo levemente influente respecto al acuífero.

La afectación a la hidrodinámica del acuífero identificada en estudios antecedentes a nivel de perforaciones, se comprueba en este trabajo a una escala más amplia, con la inversión de la relación natural arroyo-acuífero en al menos más de cuarta parte del sector de piedemonte, generando un carácter influente del arroyo respecto al acuífero.

Además de la determinación de los caudales del flujo subterráneo en el límite de cada uno de los sectores de la cuenca (sierras, piedemonte y llanura) se advierte que la alteración de la dinámica natural en el piedemonte por la explotación antrópica modifica el aporte de caudal subterráneo a la llanura, siendo menor incluso al aporte del sector de sierras al de piedemonte.

El comprobado carácter influente del arroyo en el área estudiada y la conjunción de perforaciones para suministro de agua de red y descargas urbanas e industriales al arroyo en dicha área, representan un riesgo de contaminación al medio subterráneo que se utiliza para el consumo, siendo necesario llevar adelante un estudio en profundidad y un monitoreo de la situación para definir con precisión las características de ese riesgo.

Es necesario que la política de manejo del servicio de red cloacal y de la generación de efluentes industriales esté en el marco de una visión ambiental integral y tenga como propósito el mejoramiento de las condiciones de vuelco de ambos tipos de efluentes para proteger tanto el recurso hídrico superficial como el subterráneo.

BIBLIOGRAFÍA

Banda Noriega, R., Ruiz de Galarreta, A., Barranquero, R., Díaz, A., Miguel, E. y Rodríguez, C. (2010). Análisis de fuentes y cargas contaminantes y su relación con el recurso hídrico en Tandil. *Estudios Ambientales II. Tandil y área de influencia (CINEA - FCH - UNICEN)* 141-152.

Barranquero, R. (2015). Análisis y evaluación del sistema hidrogeológico ambiental en la cuenca del arroyo Langueyú, Tandil, Buenos Aires. Universidad Nacional de Córdoba. *Tesis de doctorado: 258 pp. y anexos (Inédita)*.

Barranquero, R., Miguel, E., Ruiz de Galarreta, A. y Varni, M. (2008). Influencia de la explotación local del recurso hídrico subterráneo sobre la hidrodinámica regional en Tandil, Buenos Aires, Argentina. *IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*.

Barranquero, R., Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R. (2006). Análisis integral de la gestión del recurso hídrico en la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM - FCEIA (UNR) 12, 65-75*.

Bernabé, M. A. (2004). Carta de Riesgo Hídrico de Tandil: Un Instrumento de Gestión Ambiental. Tandil, Buenos Aires. *Tesis (GADU II). Inédita*.

- Brunke, M. y Gonser, T. (1997). The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37, 1-33.
- Cox, M., Su, G. y Constantz, J. (2007). Heat, chloride, and specific conductance as groundwater tracers near streams. *Groundwater* 45(2), 187-195.
- Custodio, E. y Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea. Tomos I y II*, Barcelona, España: Editorial Omega.
- Díaz, A. A. y Ruiz de Galarreta, A. (2010). Relación hidrodinámica entre el arroyo Languayú y el medio subterráneo (Paraje De la Canal, Tandil). *1º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras "Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura"*.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A. y Chávez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica* (Vol. 1). United Nations Publications.
- Eglin, I., Roeck, U., Robach, F. y Le Tremolieres, M. (1997). Macrophyte biological methods used in the study of the exchange between the Rhine river and the groundwater. *Water Research*, 31(3), 503-514.
- Fidalgo, F., De Francesco, F. y Pascual, R. (1975). Geología superficial de la Llanura Bonaerense. *VI Congreso Geológico Argentino*.
- González-Pinzón, R., Ward, A.S., Hatch, C.E., Wlostowski, A.N., Singha, K., Gooseff, M.N., Haggerty, R., Harvey, J.W., Cirpka, O.A. y James Brock, T. (2015). A field comparison of multiple techniques to quantify groundwater–surface-water interactions. *Freshwater Science* 34(1), 139-160.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. y McDonald, M. G. 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92.
- INDEC. (2010). <http://www.censo2010.indec.gov.ar/resultadosdefinitivos.asp>
- Kalbus, E., Reinstorf, F. y Schirmer M. (2006). Measuring methods for groundwater–surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 873-887.
- Li, Z-p., Cao, L-h., Chen, X-g., Shen, Z-l. y Zhong, Z-s. (2008). Influence on shallow groundwater by nitrogen in polluted river. *Journal of Coal Science and Engineering (China)* 14(1), 103-108.

OPDS. (2009). Informe inédito dirigido al municipio de Tandil. *Expediente: 2436-10771/08. OPDS, La Plata.*

Rodríguez-Iturbe, I. y Porporato, A. (2004). Ecohydrology of water-controlled ecosystems. *Soil moisture and plant dynamics*, Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Ruiz de Galarreta, A. (2006). Geohidrología y balance hidrológico de la zona no saturada en la cuenca superior del arroyo Tandileofú, provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional de La Plata. *Tesis doctoral: 181 pp. (Inédita).*

Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R. (2005). Geohidrología y evaluación de nitratos del Partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina. *IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea.*

Ruiz de Galarreta, A., Banda Noriega, R., Najle, R., Rodríguez, C., Barranquero, R., Díaz, A., Miguel, E., Pereyra, M. y Priano, M. (2013). Análisis de la calidad del agua del arroyo Langueyú, Tandil, Buenos Aires. *Revista digital Estudios Ambientales* 1(1), 2-28.

Ruiz de Galarreta, A., Varni, M., Banda Noriega, R. y Barranquero, R. (2007). Caracterización geohidrológica preliminar en la cuenca del arroyo Langueyú, Partido de Tandil, Buenos Aires. *V Congreso Argentino de Hidrogeología, Asociación Internacional de Hidrogeólogos.*

Sala, J.M., Kruse, E. y Aguglino, R. (1987). Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. *Informe 37, CIC.*

Sánchez- Martos, F., Gisbert-Gallego, J. y Molina-Sánchez, L. (2012). Consideraciones hidroquímicas sobre dependencia agua superficial-subterránea en la cuenca del río Andarax (Almería, SE de España). *7ma Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica.*

Sanz, D., Castaño, S., Cassiraga, E., Sahuquillo, A., Gómez-Alday, J.J., Peña, S. y Calera, A. (2011). Modeling aquifer–river interactions under the influence of groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeology Journal* 19, 475-487.

Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* 10(1), 52-67.

Strauch, G., Möder, M., Wennrich, R., Osenbrück, K., Gläser, H-R., Schladitz, T., Müller, C., Schirmer, K., Reinstorf, F. y Schirmer, M. (2008). Indicators for Assessing Anthropogenic Impact on Urban Surface and Groundwater. *Journal Soils Sediments* 8(1), 23-33.

Teruggi, M. y Kilmurray, J. (1975). Tandilia. *VI Congreso Geológico Argentino*.

Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*, New Jersey, USA: Laboratory of Climatology.