



## Evaluación del comportamiento hidrodinámico y cuantificación de la recarga en la cuenca del arroyo Languyú, partido de Tandil

Barranquero, Rosario <sup>1</sup> - Varni, Marcelo <sup>2</sup> - Ruiz de Galarreta, Alejandro <sup>3</sup> - Ocampo, Dora <sup>4</sup>

Recibido: 19 de abril de 2011 • Aceptado: 28 de octubre de 2011

### Resumen

*El presente trabajo fue desarrollado en la cuenca del arroyo Languyú, que se ubica en el partido de Tandil, enmarcada por las sierras de Tandilia (provincia de Buenos Aires, Argentina), y posee una extensión aproximada de 600 km<sup>2</sup>. El objetivo del mismo fue la estimación de la recarga, a través de la aplicación del balance de masas de cloruro y un balance de agua en el suelo a paso de tiempo diario para el período junio 2007 a junio 2008. Se consideró además importante evaluar las oscilaciones del nivel freático durante el período de un año y las relaciones que éstas presentan con la ocurrencia de precipitaciones, a fin de comprender en profundidad el funcionamiento hidrodinámico de la cuenca. Para ello se contó con datos de una red monitorea de 30 perforaciones de carácter estacional, en la cual se realizaron campañas hidrométricas cada tres meses, completando así un ciclo anual. La recarga, según el balance de cloruro, fue de entre 17 y 13 % de la precipitación total en el sector de serranía (cuenca alta) y disminuyó hacia el sector de llanura (cuenca baja). Los resultados del balance de agua en el suelo indicaron una misma distribución espacial de la recarga. Se concluyó que la recarga en la cuenca es regionalmente autóctona por precipitaciones, ubicándose mayormente en el sector de serranía aunque también es de magnitud importante en el sector de piedemonte.*

**Palabras clave:** Cuenca del arroyo Languyú, hidrodinámica, balance de cloruros, balance de agua en el suelo.

### Abstract

*This paper was carried out in Languyú river basin which is located in the Tandil county, framed by the hilly range system of Tandilia (province of Buenos Aires, Argentina), and has 600 km<sup>2</sup> surface. The objective of the work was to estimate the recharge through the application of chloride mass balance and soil water balance on daily basis, for the period June 2007 to June 2008. It was also considered important to assess the groundwater levels fluctuations during one year and the relationships with the occurrence of rainfall. According with this, a monitoring network of thirty wells with seasonally measures was carried out. The recharge, according to the chloride mass balance was between 17 and 13 % of the total*

1 CONICET (Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas). CINEA (Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales). UNICEN (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires).

✉ rosariobarranquero@yahoo.com.ar

2 IHLLA (Instituto de Hidrología de Llanuras) "Dr. Eduardo J. Usunoff" [UNICEN-Comisión de Investigaciones Científicas (CIC)-Municipalidad de Azul].

3 CIC-CINEA-UNICEN.

4 CIC-IHLLA.

rainfall in the hilly range area (upper basin) and fell into the lowland sector (lower basin). The results of water balance in the soil indicated the same spatial distribution of recharge. It was concluded that recharge in the basin is regionally autochthonous by precipitation, mainly located in the hilly range area but it is also important in the piedmont sector.

**Keywords:** Languyú river basin, hydrodynamic, chloride balance, soil water balance.

## INTRODUCCIÓN

Se denomina recarga a la porción del agua que se ha infiltrado, que efectivamente desciende por gravedad hasta el nivel freático (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2009). Considerando que la recarga es un proceso complejo, su cuantificación es considerada generalmente como una estimación.

Teniendo en cuenta la escasez de antecedentes respecto a la cuantificación de la recarga en la cuenca de interés, se planteó como objetivo una primera aproximación a la estimación de la misma a través de la aplicación de un balance de cloruro y un balance de agua en el suelo a paso de tiempo diario.

Para completar el análisis hidrodinámico, se evaluó el comportamiento de los niveles freáticos en un ciclo anual y las relaciones que éste presenta con la ocurrencia de precipitaciones.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se limitó a la cuenca del arroyo Languyú ubicada en el centro-Sudeste de la provincia de Buenos Aires, con cabeceras en el sistema serrano de Tandilia (Figura 1),

y que posee una extensión aproximada de 600 km<sup>2</sup>, desde las nacientes en el faldeo N de las sierras de Tandil hasta el límite del partido de Tandil con el de Ayacucho.

### Características físicas de la cuenca

La cuenca del arroyo Languyú tiene la particularidad de presentar un escurrimiento superficial poco definido y disperso en la mayor parte de su área. Sólo en sus cabeceras, controladas por serranías, se identifica la concentración de aguas típica de la definición de cuenca. En tanto, en su área restante presenta dispersión y/o ausencia de definición del escurrimiento superficial. Esta dinámica superficial tiene correspondencia clara respecto al agua subterránea. Por ello, sólo en la zona serrana se puede establecer una delimitación precisa de la cuenca subterránea, en concordancia con las divisorias de agua determinadas por las sierras, las cuales están controladas por afloramientos rocosos. Aguas abajo, a medida que se pasa pasamos a la zona llana, los límites laterales no son tan claramente visibles de acuerdo al relieve y pueden variar por fenómenos naturales y acciones antrópicas. En principio, se han trazado en forma perpendicular a las curvas de nivel topográfico y han sido verificados luego

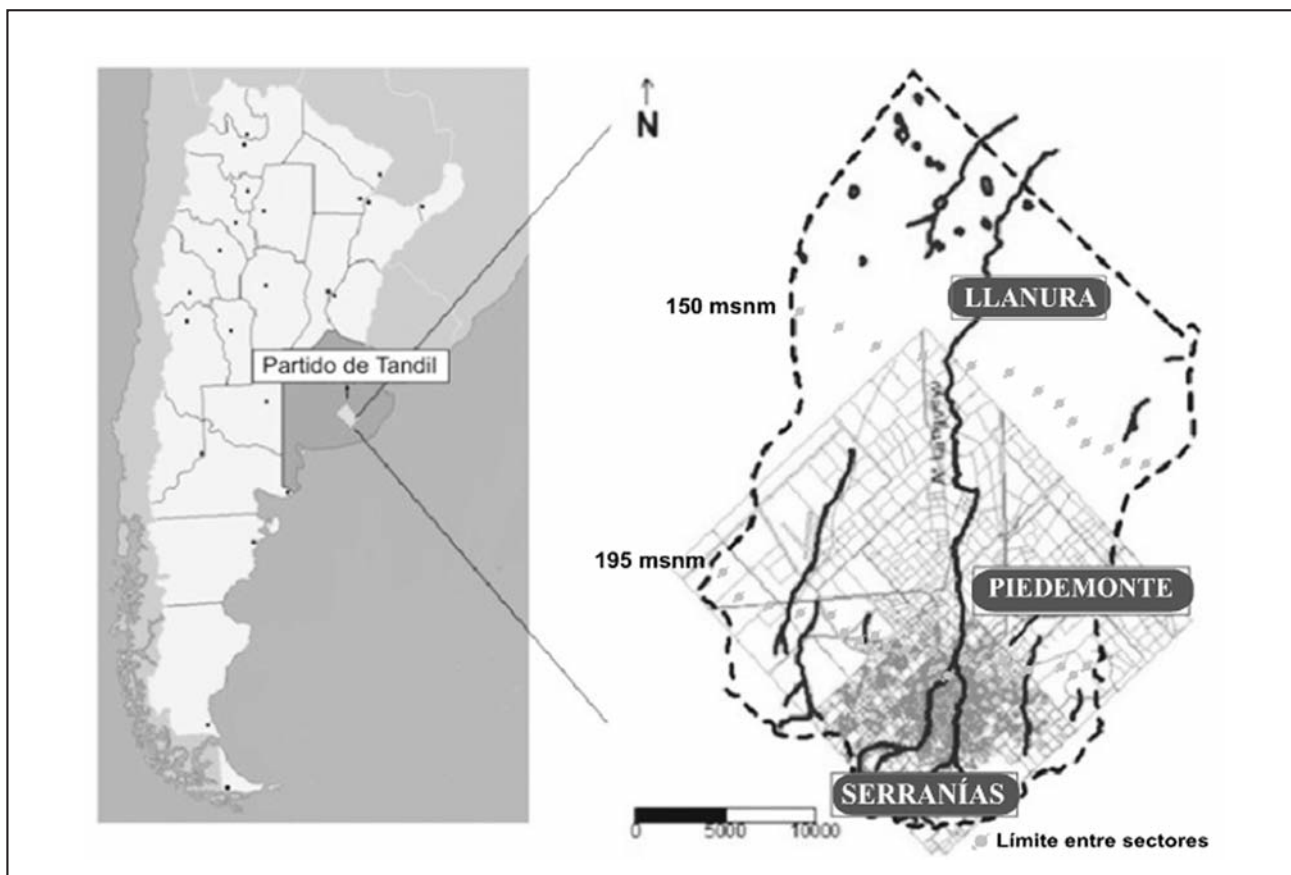


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Languyú y unidades morfológicas.

de obtener las equipotenciales de las aguas subterráneas. En tanto, en el borde N de la cuenca se estableció como demarcación arbitraria la divisoria política entre los partidos de Tandil y Ayacucho a fin de acotar el área de estudio, aunque el límite real se halla más al N, en la zona deprimida del río Salado, es decir que existe un flujo de agua (superficial y subterráneo) que egresa a través de este límite.

Esta cuenca presenta tres **unidades morfológicas** principales que por sus características particulares determinarían distintas dinámicas de recarga (ver Figura 1):

- Sector de serranías: caracterizado por la presencia de sierras, cerros aislados y valles. En este sector los valles de los cursos de agua están bien definidos (*Ruiz de Galarreta y Banda Noriega 2005*).
- Sector de Piedemonte: el mismo se localiza en continuidad con el primer sector, tiene pendientes más suaves que este último y ciertas depresiones aisladas que interrumpen la regularidad del relieve. Presenta una red de drenaje bien definida y con diseño distributivo (*Ruiz de Galarreta y Banda Noriega 2005*).
- Sector de llanura (*Fidalgo et al. 1975*): se caracteriza por la presencia de pendientes muy suaves. El drenaje poco definido y pobremente integrado muestra cauces estrechos, cursos temporarios y depresiones aisladas.

En el área de estudio se distinguen dos **unidades hidrogeológicas** que se comportan de manera diferente por su constitución, textura y estructura, en cuanto a la admisión y circulación del agua subterránea (*Ruiz de Galarreta y Banda Noriega 2005*). El Basamento Cristalino está compuesto por rocas primariamente acuífugas con distintos grados de fracturación que le confieren un carácter de acuífero pobre. Este material se corresponde con un ambiente fisurado que presenta porosidad y permeabilidad secundarias. El cuerpo cristalino, aflorante en las sierras, se profundiza hacia el N constituyendo la base del sistema acuífero poroso. En tanto, los Sedimentos Pampeanos y Postpampeanos, que integran la Cubierta Sedimentaria, constituyen un medio poroso en el que se ubica la batería de pozos de explotación utilizada para el abastecimiento de agua potable a la ciudad.

El sentido del flujo subterráneo regional es hacia el Noroeste. En tanto, la recarga del acuífero es regionalmente autóctona por precipitaciones, ubicándose las zonas preferenciales en el sector de serranías (*Ruiz de Galarreta et al. 2007*).

Si bien de acuerdo a la hidrodinámica regional las aguas subterráneas tienen naturalmente un carácter influente respecto al arroyo Langueyú y sus afluentes, existe una importante distorsión del flujo subterráneo, generada por la explotación del recurso, que ha producido la inversión de esta relación en las inmediaciones del predio de OST (Obras Sanitarias Tandil).

A partir de los datos de temperaturas y precipitaciones mensuales de 101 años correspondientes a la Estación Tandil del SMN (Servicio Meteorológico Nacional), *Ruiz de Galarreta (2006)*, considerando los balances climáticos de *Thornthwaite y Mather (1957)*, tipificó el clima de la ciudad como subhúmedo-húmedo, mesotermal, con un déficit de agua poco significativo y veranos frescos. Utilizando dichos balances para el período 1900-2000 (Tabla 1) se obtuvo un valor medio anual de precipitación (P) de 838 mm, la evapotranspiración real (ETR) y potencial (ETP) son de 694 y 712 mm, respectivamente, con un déficit poco significativo (18 mm) correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo. Los excesos hídricos suman 144 mm y se distribuyen en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre (*Ruiz de Galarreta et al. 2007*).

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el período de diciembre de 2006 a marzo de 2007, se relevó la existencia y accesibilidad de perforaciones particulares de extracción de agua subterránea, efectuando la medición del nivel de agua y la toma de muestras en los casos que esto fuera posible. Habiendo analizado la información recabada anteriormente se efectuó una selección de 30 perforaciones para llevar a cabo su monitoreo (Figura 2). Las campañas correspondientes a la red monitorea tuvieron carácter estacional, se realizaron en los meses de junio y octubre del año 2007 y febrero y junio del 2008, completando así un ciclo anual. En la Tabla 2 se muestra la totalidad de los datos de nivel estático (N.E.) obtenidos en las distintas campañas, la fecha de medición en cada pozo y el sector al que corresponde.

Tabla 1. Balance hídrico para el período 1900-2000 Tomado de Ruiz de Galarreta et al. 2007

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>P (mm)</b>	86	78	99	68	67	49	41	44	61	83	83	79	838
<b>ETP (mm)</b>	124	95	83	51	29	17	18	22	33	55	78	107	712
<b>P-ETP(mm)</b>	-38	-17	16	17	38	32	23	22	28	28	5	-28	
<b>P aa (mm)</b>	-66	-83										-28	
<b>Alm. (mm)</b>	96	85	101	118	150	150	150	150	150	150	150	124	
<b>Dif. Alm.</b>	-28	-11										-26	
<b>Déficit (mm)</b>	10	6										2	18
<b>Excesos (mm)</b>	-	-	-	-	6	32	23	22	28	28	5	-	144
<b>ETR (mm)</b>	114	89	83	51	29	17	18	22	33	55	78	105	694

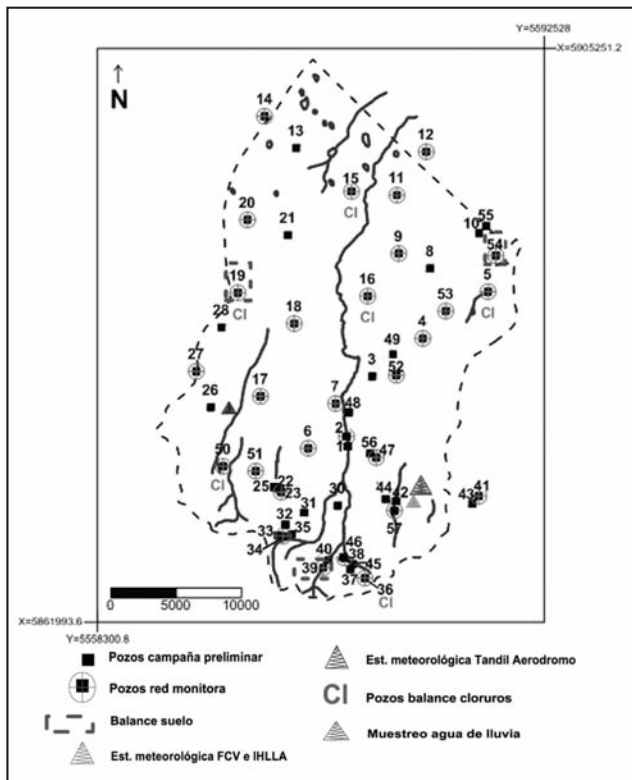


Figura 2. Perforaciones y sitios de muestreo de agua de lluvia y subterránea.

Para considerar la fluctuación de los niveles medidos en relación a las precipitaciones, se evaluó en primera instancia la ocurrencia de éstas respecto al balance hidrológico modular en el período 1900-2000 (Ruiz de Galarreta 2006). Los datos recabados en las distintas campañas fueron sistematizados y procesados, obteniendo los estadísticos para el conjunto de perforaciones de cada campaña y los gráficos de evolución del nivel freático en cada perforación. Se evaluó además esta evolución en función de las precipitaciones representando las sumatorias mensuales junto a los niveles estáticos obtenidos en cada pozo.

Respecto a la estimación de la recarga, tanto el balance de cloruro como el balance de agua en el suelo, se aplicaron para el período junio 2007 a junio 2008, considerando perforaciones representativas de cada uno de los ambientes geomorfológicos presentes en la cuenca (serranía, piedemonte y llanura) de la red de monitoreo de carácter estacional (Figura 2).

#### Balance de cloruro

El balance de cloruro se basa en el aumento de la concentración del ión cloruro como resultado de la evapotranspiración, en el camino que recorre el agua desde el nivel del terreno al nivel freático. Dado que el cloruro es un ión conservativo, por su elevada solubilidad y estabilidad, puede decirse que es un trazador natural del movimiento del agua. Considerando que el terreno sólo puede aportar este elemento en una ínfima proporción en condiciones naturales en la zona no saturada, en condiciones de permanencia (steady state) el principio de conservación de la masa establece que la masa de cloruro aportada por la lluvia es la misma que la zona no saturada aporta al acuífero freático con la recarga a largo plazo. Puede considerarse que el contenido de cloruros de una muestra de agua extraída

de la porción superior del acuífero es representativa de la concentración de cloruros de la recarga.

La ecuación utilizada convencionalmente considera que la muestra de agua obtenida de la precipitación incorpora la masa de cloruros de la deposición seca, y se expresa con la siguiente fórmula (Custodio 1997):

$$P * Cl'_p = R * Cl_r \quad (1)$$

siendo: P= precipitación; R= recarga; Cl<sub>r</sub>= concentración de cloruros de la recarga; Cl'<sub>p</sub>= concentración de cloruros de la lluvia más deposición seca.

Para el sector de serranías se considera adecuado incorporar al balance de cloruros el escurrimiento superficial, por lo cual se modifica la ecuación (1) obteniendo la ecuación (2):

$$(k * P) * Cl'_p = R * Cl_r \quad (2)$$

siendo: k= un coeficiente que equivale 100% (correspondiente a la P) menos el porcentaje correspondiente al escurrimiento superficial. Se considera que el escurrimiento superficial posee la misma concentración de cloruros que el agua de lluvia.

El valor de precipitación utilizado para el cálculo correspondió a la precipitación mensual para el período junio 2007-junio 2008, calculada a partir de datos del SMN (Estación 876450 SAZT "Tandil Aerodromo". Latitud: -37.23; Longitud: -59.25; Altitud: 175) (Figura 2). Se decidió adoptar un valor k de 0.96, teniendo en cuenta el valor de escurrimiento superficial medio de 4 % de la precipitación obtenido por Sala et al. (1987) y Kruse (1992) en la cuenca del arroyo Azul. Es importante destacar que dicha cuenca tiene sus nacientes en el sistema de Tandilia, al igual que la cuenca en estudio, y presenta características geomorfológicas e hidrodinámicas similares a ella. También se cuenta con el antecedente de Marchetti (1968) que estimó un escurrimiento de entre 3 y 7 % de la precipitación para un sector interserrano del Sur de la provincia de Buenos Aires.

La concentración de cloruros de la recarga se obtuvo realizando el promedio de los valores de concentración de cloruros determinados en cuatro campañas de la red monitorea. Para este cálculo se consideraron 2 perforaciones representativas de cada ambiente geomorfológico (ver Figuras 1 y 2).

El valor de concentración de cloruro en el agua de lluvia correspondió a la recolección de la precipitación y el posterior análisis, llevado a cabo durante 3 años en un sitio de muestreo ubicado en el sector Sudeste de la cuenca (Ruiz de Galarreta y Varni 2010) (Figura 2).

#### Balance de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo estima la disponibilidad de agua en el mismo, considerando que depende de la precipitación, del escurrimiento superficial, de la evapotranspiración y del drenaje profundo o percolación, sin flujo subsuperficial lateral en el caso de la llanura (Varni 2005).

Para efectuar el balance para el período junio 2007 a junio 2008 se seleccionaron tres perforaciones de la red de monitoreo que tuvieran distintas características edáficas y

Tabla 2. Niveles estáticos calculados a partir de las campañas que conforman el ciclo anual.

POZO	FECHA	N.E.	FECHA	N.E.	FECHA	N.E.	FECHA	N.E.	SECTOR
2	19/06/07	159,8	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	Piedemonte
4	17/06/07	141,4	16/10/07	143,5	11/02/08	141,7	02/06/08	141,8	Piedemonte
5	18/06/07	130,0	16/10/07	131,3	11/02/08	130,0	02/06/08	130,4	Llanura
6	17/06/07	171,9	16/10/07	171,4	11/02/08	170,5	02/06/08	171,1	Piedemonte
7	17/06/07	158,6	17/10/07	159,6	12/02/08	158,0	02/06/08	158,4	Piedemonte
9	17/06/07	132,1	16/10/07	133,2	11/02/08	132,2	02/06/08	132,7	Piedemonte
11	s/d	s/d	16/10/07	124,5	11/02/08	123,5	02/06/08	124,1	Llanura
12	17/06/07	118,9	16/10/07	120,0	11/02/08	118,6	02/06/08	119,1	Llanura
14	17/06/07	124,0	16/10/07	125,5	11/02/08	124,4	02/06/08	124,7	Llanura
15	18/06/07	126,6	16/10/07	127,9	11/02/08	126,8	02/06/08	127,0	Llanura
16	17/06/07	139,9	17/10/07	140,9	11/02/08	140,6	s/d	s/d	Piedemonte
17	17/06/07	160,1	17/10/07	162,0	12/02/08	159,1	03/06/08	160,1	Piedemonte
18	18/06/07	148,4	16/10/07	149,8	11/02/08	148,5	02/06/08	148,3	Piedemonte
19	18/06/07	144,3	16/10/07	145,7	11/02/08	144,9	02/06/08	145,0	Piedemonte
20	18/06/07	135,0	16/10/07	136,0	11/02/08	134,8	02/06/08	135,0	Llanura
23	17/06/07	190,6	17/10/07	190,5	12/02/08	189,9	03/06/08	189,3	Serranías
27	17/06/07	176,7	17/10/07	177,4	11/02/08	175,5	03/06/08	175,6	Piedemonte
34	17/06/07	236,3	17/10/07	237,3	12/02/08	236,1	s/d	s/d	Serranías
36	17/06/07	214,6	17/10/06	212,8	12/02/08	212,6	03/06/08	212,9	Serranías
38	17/06/07	204,9	18/10/07	205,4	12/02/08	204,5	03/06/08	204,9	Serranías
39	17/06/07	225,9	17/10/07	226,7	12/02/08	225,8	03/06/08	226,4	Serranías
41	17/06/07	147,6	17/10/07	147,6	12/02/08	147,2	03/06/08	147,1	Serranías
47	17/06/07	155,4	17/10/07	156,0	12/02/08	155,6	03/06/08	155,3	Piedemonte
50	17/06/07	194,1	17/10/07	194,2	12/02/08	194,0	03/06/08	193,9	Serranías
51	17/06/07	192,2	17/10/07	192,4	12/02/08	192,5	03/06/08	193,3	Serranías
52	17/06/07	152,1	16/10/07	153,6	11/02/08	151,8	02/06/08	152,0	Piedemonte
53	17/06/07	136,1	16/10/07	137,7	11/02/08	136,2	02/06/08	136,4	Llanura
54	18/06/07	124,3	16/10/07	125,5	11/02/08	124,7	02/06/08	125,1	Llanura
57	18/06/07	176,0	17/10/07	176,5	12/02/08	175,0	04/06/08	175,7	Serranías

geomorfológicas y que no mostraran una afectación antrópica en su hidrodinámica. Esta selección se basó en la posibilidad de tener datos de precipitación del propio lugar seleccionado. Las perforaciones seleccionadas fueron la 39 ubicada en la parte alta de la cuenca, la 19 correspondiente al sector medio y la 54 ubicada al Noreste del área de estudio, es decir en el sector de llanura (ver Figuras 1 y 2).

Para el área de influencia de cada una de estas perforaciones se realizó un balance de agua en el suelo a paso diario. Para ello se utilizó una planilla de cálculo donde los datos de entrada son la P y la ETP diarias y los niveles freáticos de las fechas en las que se han medido. A partir de la ETP se calcula la ETR teniendo en cuenta la reserva útil almacenada en el suelo con anterioridad al momento de cálculo y la infiltración. Por

otra parte, el balance se ajusta tratando de reproducir los niveles freáticos, para lo cual se cuenta con dos módulos: uno de recarga y otro de descarga del acuífero. Los parámetros de calibración son: la capacidad de almacenamiento del suelo (Alm), el número de curva (CN), el nivel de descarga de las aguas subterráneas regional (Nbase 1) y local (Nbase 2) con sus correspondientes coeficientes de agotamiento (Alfa 1 y Alfa 2), y finalmente el almacenamiento específico en la zona de variaciones del nivel freático (Pe). Estos parámetros fueron definidos de acuerdo a las características de cada una de las áreas en las que se hallan las perforaciones 39, 19 y 54 y con el objeto de reproducir lo más fielmente posible las fluctuaciones de nivel registradas en los pozos. Dichos parámetros se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de calibración del balance de agua en el suelo.

POZO	SECTOR	Alm (mm)	CN	Nbase 1 (m snm)	Nbase 2 (m snm)	Alfa 1	Alfa 2	Pe
39	Serranías	55	50	80	224,7	0,00003	0,004	0,05
19	Piedemonte	81	55	70	143	0,000012	0,0039	0,06
54	Llanura	60	79	60	124,3	0,00005	0,009	0,05

La planilla de cálculo utilizada está diseñada de forma tal de efectuar el balance de agua en el suelo de acuerdo a los siguientes pasos:

1. El día que llueve el agua escurre superficialmente según lo que indica el CN. Como se señaló antes, se adopta un CN para las condiciones medias de suelo y cultivo, el cual puede modificarse dentro de límites razonables en función de condiciones puntuales; es por esto que se consigna como parámetro de calibración. Sin embargo el CN no es constante, sino que varía, siguiendo la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (*USDA SCS 1985*), según la lluvia de los cinco días previos. Por lo tanto lo que no escurre infiltra, y esta agua es la que se incorpora al almacenamiento del suelo.

2. Si el agua infiltrada más la que estaba almacenada en el suelo supera su capacidad de almacenamiento, se produce un exceso que se cuantifica como recarga en milímetros. Es entonces que se produce el ascenso del nivel freático, que está dado por la recarga dividida por el almacenamiento específico.

3. El agua que queda almacenada en el suelo es evapotranspirada cada día según una ETR que se obtiene de adoptar una variación lineal de ETR entre ETR=0 para almacenamiento nulo y ETR=ETP para almacenamiento igual a la capacidad de almacenamiento del suelo. Entonces, cada día se ajusta el almacenamiento sumándole el agua infiltrada (lluvia menos escorrentía) y restándole la ETR, siempre que no exceda su capacidad de almacenamiento.

4. Hasta el paso 3 se podría considerar que se trata del módulo de recarga. Simultáneamente, el módulo de descarga del acuífero, se basa en que éste descarga aguas hacia zonas de descarga regional (en el caso de la cuenca estudiada: el río Salado) y hacia zonas de descarga más locales (arroyo Langueyú). Eso hace que el nivel del acuífero descienda. La ecuación de descarga es del tipo:

$$Descenso = \alpha (hac - hdesc) \quad (3)$$

donde:  $\alpha$  es un coeficiente de agotamiento,  $hac$  el nivel de agua en el pozo ese día y  $hdesc$  el nivel de descarga (una altura que represente al río Salado, por ejemplo). Para este estudio se utilizaron dos ecuaciones de descarga: una para descarga regional y otra para cercana o local.

El cálculo encadenado de cada uno de estos procesos permite obtener un nivel del acuífero para cada día. Variando los parámetros, dentro de un rango razonable establecido de acuerdo a las características del área, se intenta que los niveles calculados reproduzcan lo mejor posible los niveles medidos en campo.

Los datos de precipitación empleados en el balance, correspondieron a la estación a cargo de la Facultad de Ciencias Veterinarias (UNICEN) e IHLLA, con coordenadas 37° 19' 17" S, 59° 04' 50" O (Figura 2). Los datos de evapotranspiración fueron suministrados por el IHLLA y son resultado del empleo de la ecuación de Penman-Monteith ajustada al área de estudio (*Ocampo et al. 2009*).

El almacenamiento en el suelo se estimó utilizando las funciones de pedotransferencia propuestas por *Saxton y Rawls (2007)*.

Los balances se ajustaron minimizando el error calculado como:

$$EMC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(med - sim)^2} \quad (4)$$

donde: EMC es el error medio cuadrático,  $n$  es el número de niveles medidos,  $med$  el valor de cada nivel medido y  $sim$  es el valor que simula el balance.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de las precipitaciones en el período de estudio, puede inferirse que ha sido un año seco respecto al balance modular, dado que totaliza una precipitación de 623 mm. Para el período de análisis, durante los meses de mayo, julio, agosto y noviembre, en los cuales se registran excesos importantes en el balance modular, se han producido precipitaciones muy inferiores a la media histórica.

La representación de los niveles estáticos junto a las precipitaciones mensuales, ha permitido observar que en la mayoría de las perforaciones existe una cierta respuesta del nivel a los eventos de lluvia, condicionada por la evapotranspiración. Como puede observarse en la Figura 3 (representación del comportamiento en la perforación 38 ubicada en la parte alta de la cuenca) las precipitaciones en los meses de junio y septiembre del 2007 han generado evidentemente una recarga importante, reflejándose esto en los niveles encontrados en las campañas realizadas a mediados de junio, en el primer caso, y octubre en el segundo. En cambio, el aumento de la precipitación en el mes de enero del 2008 no se ha reflejado en la respuesta del nivel, siendo éste en la campaña del mes de febrero más bajo que en la anterior. Este hecho se justifica en los eventos de precipitación de tipo torrencial y en la alta evapotranspiración del período, que han disminuido la posible recarga asociada al evento de lluvia. En el mes de junio, aún siendo escasas las precipitaciones en los meses anteriores, se observa una recuperación del nivel freático asociada a la disminución de la evapotranspiración que ha permitido un aumento de la recarga.

A partir del análisis de la totalidad de los gráficos se observa que, aunque con magnitudes diferentes, la evolución del nivel estático presenta un mismo comportamiento en las perforaciones ubicadas en distintos sectores de la cuenca. En las Figuras 4 y 5 se representan los niveles estáticos en los pozos 52 y 54, ubicados en la parte media y Noreste respectivamente. Esta evolución normalizada se ha observado en el 75 % de las perforaciones de la red de monitoreo. En los pozos restantes se presenta una evolución del nivel freático muy diferente que se asocia a su ubicación en un área de distorsión del flujo natural, generada por la extracción de importantes caudales y los descensos abruptos del nivel en las perforaciones en explotación para el suministro de agua de red a la ciudad.

A partir de los datos de la Tabla 2 se calcularon los valores mínimos, medios y máximos para los niveles observados en la red monitorea (Tabla 4).

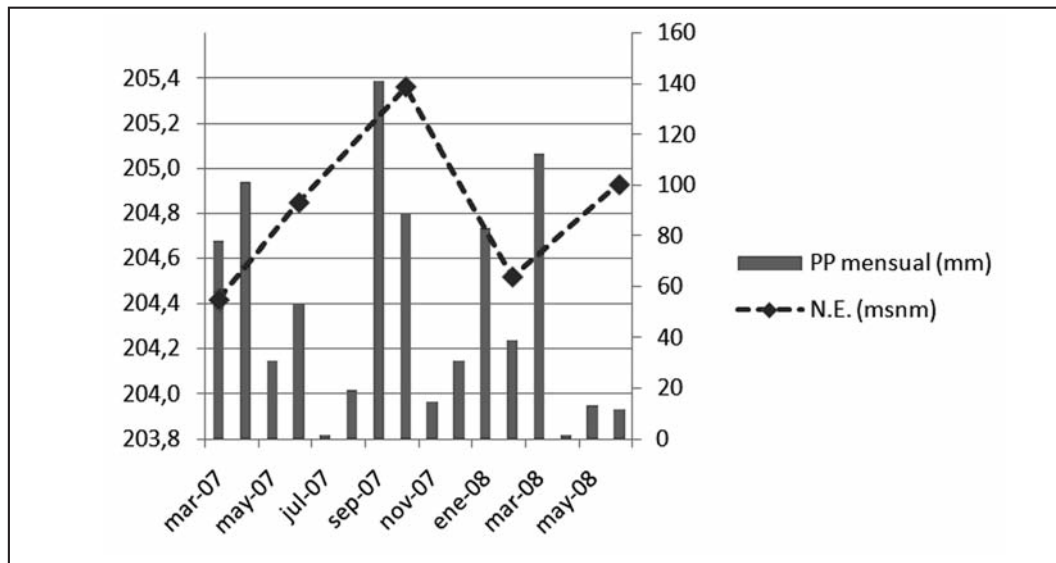


Figura 3. Comportamiento del nivel freático en la perforación 38.

Tabla 4: Valores mínimos, medios y máximos de los niveles observados en la red monitorea.

Pozo	Mínimo	Máximo	Media
4	141,4	143,5	142,0
5	129,9	131,3	130,3
6	170,5	171,9	171,2
7	157,4	159,6	158,4
9	132,1	133,2	132,5
11	123,5	124,5	124,0
12	118,6	120,0	119,1
14	124,0	125,5	124,5
15	126,6	127,9	127,1
16	139,9	140,9	140,4
17	159,1	162,0	160,2
18	148,0	150,0	149,0
19	144,0	145,7	144,8
20	134,3	136,0	135,0
23	189,3	190,6	190,0
27	175,0	177,4	176,0
34	236,0	237,3	236,4
36	212,6	214,6	213,2
38	204,4	205,4	204,8
39	224,8	226,7	225,9
41	147,1	148,0	147,5
47	155,3	156,0	155,6
50	193,6	194,2	194,0
51	192,2	193,3	192,6
52	151,8	153,6	152,5
53	136,1	137,7	136,5
54	124,3	125,5	124,8
57	175,0	176,5	175,8

#### Balance de cloruro

Con una precipitación media para el período junio 2007-junio 2008 de 623 mm y una concentración de cloruros de la precipitación de 4.66 ppm, se obtiene un valor de recarga del acuífero de entre 17 y 13 % de la precipitación total, en el sector de serranías de la cuenca. En tanto, hacia el NE la recarga sería menor al 10 % de la precipitación total (Figura 6). En la Tabla 5 se muestran los valores de concentración de cloruros en el agua subterránea para cada sitio de muestreo considerado y los porcentajes de recarga calculados.

Tabla 5. Concentración de cloruros y porcentaje de recarga en los sitios de muestreo de agua subterránea.

POZO	SECTOR	CLORUROS (ppm)	RECARGA (% respecto a precipitación)
50	Serranías	34,7	12,9
36	Serranías	26,1	17,1
19	Piedemonte	29,2	16,0
16	Piedemonte	42,6	10,9
15	Llanura	64,4	7,2
5	Llanura	38,8	12,0

#### Balance de agua en el suelo

Como se ha detallado en la metodología se utiliza el balance de agua en el suelo para el cálculo de la recarga en tres puntos de la cuenca, donde se sitúan las perforaciones 39, 19 y 54. En la Tabla 6 se presentan los montos de precipitación y recarga en mm, así como el porcentaje que representa la recarga en cada balance. La coincidencia de los valores de precipitación en los tres puntos de la cuenca obedece a que, como se explicara en la metodología, se utilizaron para todos ellos los registros de una única estación. Debe destacarse además que el porcentaje de recarga para la perforación 39 carece de validez dado el alto valor de error que posee el ajuste (41 cm) de los niveles estáticos calculados respecto a los medidos.

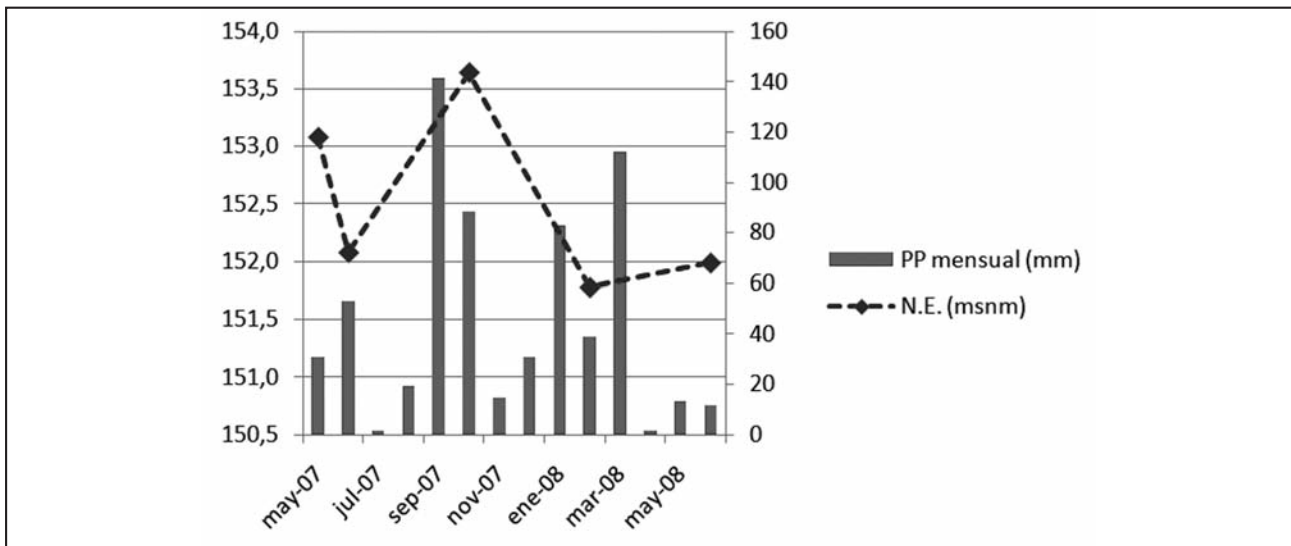


Figura 4. Evolución del NE en perforación 52.

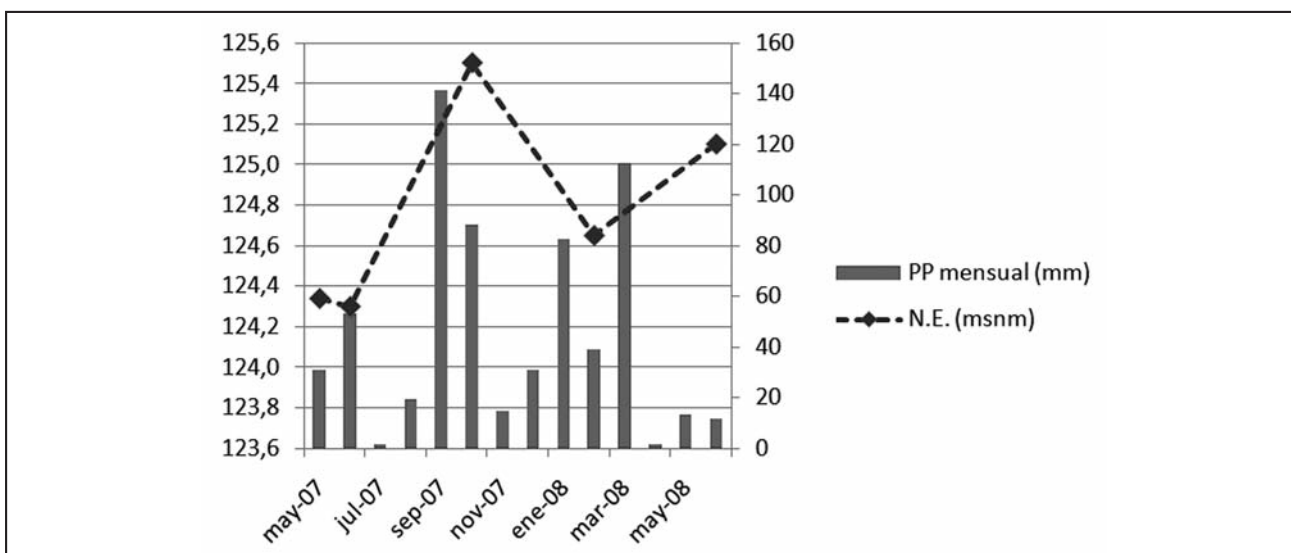


Figura 5. Evolución del NE en perforación 54.

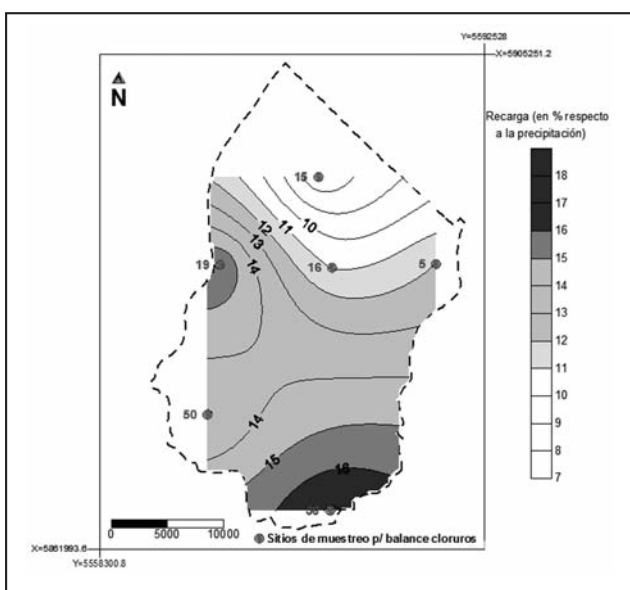


Figura 6. Variación espacial del porcentaje de recarga obtenido con el método de balance de ión cloruro.

Tabla 6. Valores de precipitación, recarga en mm y porcentaje de recarga para cada balance de agua en el suelo.

POZO	SECTOR	PRECIPITACIÓN (en mm)	RECARGA (en mm)	RECARGA (%)
39	Serranías	800	236	29,5
19	Piedemonte	800	183	22,9
54	Llanura	800	153	19,1

En la figuras 7, 8 y 9 se presentan los gráficos de los niveles medidos respecto a los calculados a través del balance en los pozos 39, 19 y 54. Sólo se analizan los resultados de los pozos 19 y 54 en los cuales se han obtenido errores aceptables.

Como puede observarse en la Tabla 6 del balance realizado con los parámetros calculados para la perforación 19, se obtiene que la recarga es de 22,9 % de la precipitación ocurrida en el período junio 2007 a junio 2008. Se ha logrado un ajuste aceptable entre los niveles medidos y los calculados, con un error medio cuadrático de 6,6 cm (Figura 8).



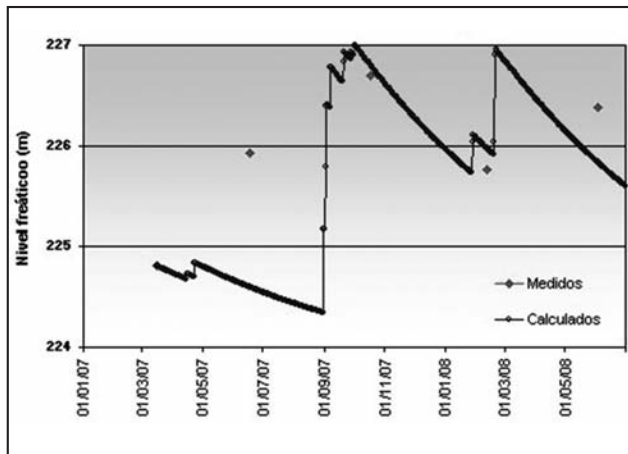


Figura 7. Gráfico de niveles medidos y calculados en la perforación 39.

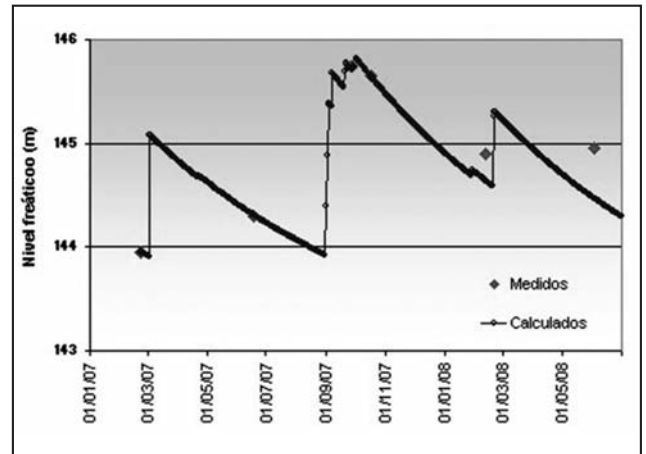


Figura 8: Gráfico de niveles medidos y calculados en la perforación 19.

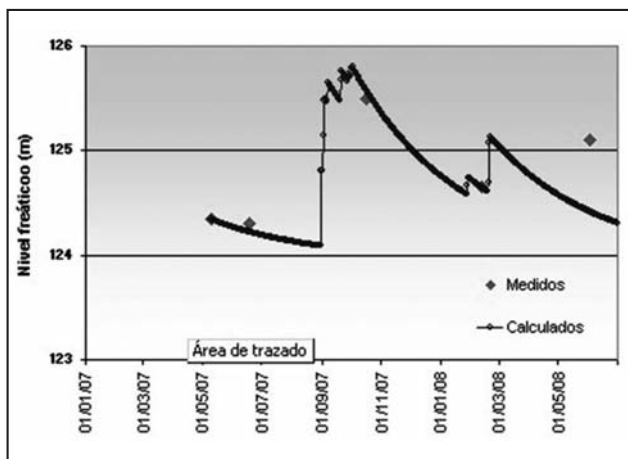


Figura 9: Gráfico de niveles medidos y calculados en la perforación 54.

En el caso de la perforación 54, ubicada en el sector de llanura, se obtiene un valor de recarga de 19.1 % del total precipitado para el período considerado. El ajuste de los niveles medidos respecto a los calculados es bueno, con un error medio cuadrático de 3.9 cm (Figura 9).

Los resultados de este balance, si bien estarían indicando que la recarga es de mayor magnitud que la que se ha obtenido con el balance de cloruros, resulta coherente con este último en cuanto a la distribución espacial. La recarga presenta una magnitud mayor en el sector de serranías y disminuye hacia la zona de llanura.

Debe tenerse en cuenta que aunque las muestras para determinar las concentraciones de cloruro se tomaron en los mismos momentos en que se midieron los niveles utilizados para ajustar el balance de agua en el suelo, el balance de cloruro involucra valores medios de recarga de un lapso considerablemente mayor, por lo que, dada la variabilidad temporal de la recarga, no correspondería compararlas en este caso.

## CONCLUSIONES

La cuenca del arroyo Languyú no es una zona típica con concentración de aguas en toda el área de estudio, sino que sólo posee estas características en el sector de serranías, produciéndose la dispersión y/o ausencia de definición del drenaje en su área restante.

El sistema presenta comportamientos netamente diferenciados de acuerdo a los sectores definidos por características geológicas y geomorfológicas (serranías, piedemonte y llanura). En el sector serrano se produce la concentración del escurrimiento, en el periserrano la dispersión del flujo y en el ámbito de llanuras, el drenaje es poco definido y pobremente integrado. Esta configuración superficial tiene su correlato con el flujo subterráneo, que muestra gradientes en franca disminución en el mismo sentido.

Las diferencias antes citadas quedan también plasmadas en la magnitud de la respuesta a los eventos de recarga, ya que si bien se tiene una evolución normalizada de los niveles freáticos en el período de estudio en el 75 % de las perforaciones, la magnitud de la respuesta varía según el sector de la cuenca en el que se ubiquen.

La recarga es regionalmente autóctona principalmente por precipitaciones. En el sector de serranías posee una magnitud de entre 17 y 13 % de las precipitaciones según la estimación mediante el balance de cloruro. En el sector de piedemonte la recarga varía entre un 15 % en el quiebre de pendiente aldeaño a las sierras, hasta un 10 % de la precipitación al comienzo del sector de llanura.

Según el balance de agua en el suelo la recarga varía entre un 22.9 % de la precipitación ocurrida en el período considerado en el sector pedemontano, y un 19.1 % en la zona de llanura. Estos valores, aunque mayores a los obtenidos mediante el balance de cloruros, son coherentes con ellos en cuanto a la disminución de la recarga hacia la zona llana.

No se ha logrado el ajuste entre los niveles medidos y calculados en la perforación ubicada aguas arriba de la cuenca. Esto podría deberse a que el modelo de balance de agua en el suelo aplicado no es capaz de representar la combinación de los flujos en los medios fisurado y poroso clásico, presentes en este sector.

Si bien la selección de perforaciones para aplicar el balance de agua en el suelo se basó en la posibilidad de tener datos de precipitación del propio lugar seleccionado, los datos no pudieron recopilarse para su aplicación en este trabajo. Es por esto que se concluye en la necesidad de continuar trabajando en la estimación de la recarga, a partir de la obtención de datos de precipitación del lugar donde se ubica la perforación modelada y con detalles del modelo hidrogeológico definidos a escala más detallada en la zona periserrana.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CUSTODIO, E., 1997.  
Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos.  
*En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica. AIH-GE, pp. 83-109. Las Palmas de Gran Canaria.*
- FIDALGO, F.; F. DE FRANCESCO Y R. PASCUAL, 1975.  
Geología superficial de la Llanura Bonaerense.  
*En: Relatorio Geología Provincia de Buenos Aires. VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca, Pcia. de Bs. As., pp. 104-106.*
- FUNDACIÓN CENTRO INTERNACIONAL DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA, 2009.  
Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea.  
*Editor: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 768 pp.*
- KRUSE, E., 1992.  
Estimación de escurrimientos subterráneos en la cuenca del Arroyo Azul (Buenos Aires).  
*En: Situación Ambiental de la Provincia de Buenos Aires, A. Recursos y rasgos naturales en la evaluación ambiental, López, H.L. y Tonni, E.P. (Coord.). CIC, Año 2, No. 15.*
- MARCHETTI, A., 1968.  
Estudios hidrológicos de la zona sud de la Prov. de Buenos Aires.  
*Dirección General de Geología y Minería. Inédito. Carp. 578. Buenos Aires*
- OCAMPO, D.; R. RIVAS Y J. SCHIRMBECK, 2009.  
Aptitud de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración: aplicación en una zona de clima subhúmedo-húmedo.  
*En Actas del VI Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea Tomo II. Santa Rosa, La Pampa. pp. 437-446.*
- RUIZ DE GALARRETA, A. Y R. BANDA NORIEGA, 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. Octubre 2005. UNCR. Río Cuarto, Córdoba. pp. 99-108.*
- RUIZ DE GALARRETA, A. 2006.  
Geohidrología y Balance Hidrológico en Zona no Saturada en la cuenca alta del arroyo Tandileofú, Provincia de Buenos Aires.  
*Tesis doctoral. Inédita. Universidad Nacional de La Plata, 181 p.*
- RUIZ DE GALARRETA, A.; M. VARNI; R. BANDA NORIEGA Y R. BARRANQUERO, 2007.  
Caracterización geohidrología preliminar en la cuenca del arroyo Langueyú, Partido de Tandil, Buenos Aires.  
*En Díaz, E.L., Tomás, J.R., Santi, M., D'Elia, M. y DallaCosta, O., (Compiladores) V Congreso Argentino de Hidrogeología, Asociación Internacional de Hidrogeólogos. ISBN 978-987-23936-3-2. pp. 119-128.*
- RUIZ DE GALARRETA, A. Y M. VARNI, 2010.  
Análisis de la recarga del acuífero freático en la cuenca del arroyo Tandileofú, partido de Tandil.  
*Capítulo de libro, "Estudios Ambientales II" (CINEA - FCH - UNCPBA). Enviado para su publicación en diciembre del 2008 "en prensa".*
- SALA, J.M.; KRUSE, E. Y AGUGLINO, R. 1987.  
Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires.  
*Informe 37, CIC, 235 p.*
- SAXTON, K. Y RAWLS, W., 2007.  
USDA-Agricultural Research Service. USDA-ARS, Hydrology & Remote Sensing Laboratory.  
*In cooperation with Department of Biological Systems Engineering. Washington State University. Homepage: <http://www.ars.usda.gov/balanri/hrs/ksaxton>*
- THORNTHWAITE, C. W. Y J. R. MATHER, 1957.  
Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance.  
*Laboratory of Climatology, Publication núm. 10. Centertown, N. J.*
- USDA SCS, 1985.  
National Engineering Handbook, Section 4.  
*U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC.*
- VARNI, M. 2005.  
Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: Valores medios y variaciones temporal y espacial.  
*Universidad Nacional de Rosario. Tesis Doctoral: 185 pp. y anexos (inédita).*