

BALANCE DE AGUA EN UN ACUÍFERO COMO BASE PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE Y SEGURIDAD HÍDRICA

GROUNDWATER BALANCE TO SUPPORT SUSTAINABLE MANAGEMENT AND WATER SECURITY

D'Elia, Mónica¹; Paris, Marta; Pérez, Marcela

Resumen

La cuantificación de la oferta y demanda de agua de una región es un componente básico del diagnóstico que integra un plan de gestión del agua. En relación a la oferta es fundamental conocer la disponibilidad de agua del sistema. La demanda refiere a los usos y usuarios del agua, entre los que deben considerarse imperiosamente los ecosistemas, atendiendo a la sostenibilidad de la gestión y el logro de la seguridad hídrica.

En este trabajo se presenta el resultado del balance de agua que ingresa y egresa de los acuíferos en un área de llanura del centro de la Provincia de Santa Fe (Argentina) y la identificación preliminar de algunos ecosistemas dependientes del agua subterránea.

Para estimar la recarga local del acuífero libre se utilizaron diferentes metodologías, mientras que la descarga del acuífero se evaluó a partir de la continuidad entre dos secciones del río Salado. La demanda de agua subterránea para distintos usos fue estimada a partir de datos oficiales de los censos poblacionales, económicos y agropecuarios. La identificación de los ecosistemas dependientes del agua subterránea se realizó por medio de muestreos de agua y análisis en laboratorio y análisis de imágenes satelitales.

Los resultados muestran que anualmente la recarga local del acuífero libre es del orden de 21 hm³, la recarga local del acuífero semiconfinado es del orden de los 4 hm³ y la descarga al río Salado del orden de 18 hm³. La demanda de uso ganadero es del orden de 2 hm³ y el consumo humano en áreas urbanas de 14 hm³. No se contó con datos oficiales de uso de agua para fines industrial e irrigación. Se han logrado identificar microinvertebrados dependientes del agua subterránea y áreas irrigadas con agua subterránea o con presencia de vegetación freatófita, están siendo estudiadas.

Palabras Clave: gestión integrada de los recursos hídricos, balance hídrico, recarga-descarga de acuíferos, ecosistemas

Abstract

The quantification of the water supply and demand of a region is a basic component of the diagnosis that integrates a water management plan. In relation to the supply is essential to know the availability of water in the system. The demand refers to the uses and users of water, among which must be considered imperiously ecosystems, attending to the sustainability of management and the achievement of water security.

The results of the groundwater budget and the preliminarily identification of some groundwater dependent ecosystem in a plain of the Santa Fe province (Argentina) are presented in this work.

Local groundwater recharge was estimated using different methodologies, and discharge to Salado River between two sections was calculated. Groundwater demands for different uses were obtained from population, economic, agriculture and livestock official information. Groundwater dependent ecosystems were preliminarily identified by means of groundwater sampling, laboratory analysis and satellite images analysis.

The results show that groundwater local recharge to the unconfined aquifer was about 21 hm³, groundwater recharge to the semi-confined aquifer was about 4 hm³ and groundwater discharge was about 18 hm³. Livestock water demand was about 2 hm³ and human water consumption in urban areas was about 14 hm³. Official information related to irrigation and industrial groundwater demand was not available. Dependent groundwater stygofauna was identified and areas with groundwater dependent vegetation are being studied.

Keywords: integrated water resources management, water balance, groundwater recharge-discharge, ecosystems

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes en la temática

Bajo condiciones naturales previas a la explotación del agua subterránea, los acuíferos se encuentran en un estado de equilibrio dinámico: la recarga se compensa con la descarga. Tradicionalmente y en el marco de la gestión del agua subterránea, el concepto de *safe yield* (*explotación segura*) ha sido definido como el mantenimiento o sostenimiento, a

largo plazo, del balance entre el agua que se extrae y la cantidad de agua que recarga a los acuíferos anualmente. De esta manera, esta *explotación segura* limitaría la extracción de agua subterránea por bombeo a la cantidad de agua que se renueva naturalmente, pero no tiene en cuenta la descarga natural desde los acuíferos hacia ríos, lagos, mares, el flujo hacia otros acuíferos o el consumo de agua de vegetación freatófita. Por ello algunos autores

1 Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Argentina. mdelia@fich.unl.edu.ar.

Recibido: 31/03/2017
Aceptado: 30/10/2017

consideran que este concepto no puede considerarse como sustentable (Sophocleous, 1997).

Dada la profunda preocupación por alcanzar un manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos, se ha evidenciado un incremento de estudios relacionados al balance de agua subterránea y en particular a la recarga a los acuíferos. Sharma (1989), Lerner et al. (1990), Simmers (1998), Samper (1997), Custodio (1998), Scanlon et al. (2002), entre otros autores, abordaron este tema y sugirieron que, para minimizar la incertidumbre en la estimación de la recarga a los acuíferos, se apliquen y comparen diferentes procedimientos metodológicos corroborados con mediciones directas en campo.

Por otra parte, las alteraciones del equilibrio de los sistemas acuíferos pueden afectar negativamente a los ecosistemas dependientes del agua subterránea como la vegetación freatófita, humedales, ecosistemas en sistemas acuíferos en medios porosos y sistemas kársticos. Walker et al (2001) y Cook et al (2002) analizan en forma conjunta los procesos de recarga-descarga en acuíferos, resaltando la importancia del manejo de las áreas de descarga en relación con los niveles de agua subterránea y la topografía, las extracciones de agua para distintos usos, los procesos de salinización y realizan también consideraciones sobre el uso del agua subterránea por la vegetación. En tal sentido, es de destacar el desafío que implica la determinación de los requerimientos de agua subterránea de la vegetación freatófita ya que estarían condicionados por el tipo de suelo, especie, profundidad del agua subterránea y salinidad del agua.

En acuíferos en medios porosos y kársticos, se desarrolla una fauna subterránea con una gran diversidad de especies, que ha sido estudiada y clasificada por numerosos especialistas de reconocida trayectoria internacional. En Argentina, un grupo de investigadores multidisciplinar de la Universidad de Río Cuarto ha abordado el estudio de esta microfauna subterránea pudiendo distinguir algunas especies como cladóceros y copépodos en acuíferos loésicos (Blarasín et al, 2007).

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es establecer el balance de agua que ingresa y egresa de los acuíferos en un área de llanura del centro de la Provincia de Santa Fe, República Argentina, en forma preliminar, como parte de la evaluación de los recursos hídricos (oferta y demanda), base para la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

2. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el Departamento Las Colonias, en el centro de la Provincia de Santa Fe, República Argentina, entre los 31° 20' y los 31° 30' de latitud S y los 61° 05' y los 60° 45' de longitud O. Se encuentra en la región denominada llanura chaco-

pampeana, en la cuenca inferior del río Salado, al oeste del mismo. En esta zona la altitud varía entre 55 y 20 msnm con pendientes del orden de 0,1 y 0,2%. Abarca aproximadamente 500 km² e incluye áreas urbanas, suburbanas y rurales (Figura 1). En ella se emplazan la ciudad de Esperanza, capital del Departamento y otras localidades menores como Cavour y Humboldt. La principal actividad económica de la región es la agropecuaria como el cultivo de cereales y oleaginosas y la cría de ganado para producción de carne y leche. Pero además, existen importantes industrias relacionadas con esta actividad como son las metalúrgicas, lácteas, curtidorías y frigoríficos, entre otras. Todas estas actividades se sustentan en el agua subterránea que es extraída de dos importantes acuíferos de la región. La empresa Aguas Santafesinas S.A. (ASSA) realiza el aprovechamiento de agua subterránea del acuífero semiconfinado, a través de un campo de pozos ubicado al oeste de la ciudad de Esperanza. Suministra agua potable a esta ciudad a través de una red y a la ciudad de Rafaela, ubicada a 50 km al oeste del área, por medio de un acueducto.

El clima del área ha sido clasificado como C₂ B'3 r a', que corresponde a la denominación de subhúmedo húmedo (C₂), mesotermal (B'3), de nula a pequeña deficiencia de agua (r) y de baja concentración térmica estival (a') (Panigatti, 1986). La temperatura media anual en el área es de 18°C. Las mayores temperaturas medias mensuales se registran entre los meses de noviembre a marzo, alcanzando el máximo valor en el mes de enero, alrededor de 25°C, y el mínimo en los meses de junio y julio, aproximadamente 12°C. La precipitación media anual para la serie 1904-2009 es de 989 mm, con un valor máximo de 1710 mm en el año 1914 y un mínimo de 423 mm en el año 1906. Se presenta en la región una alternancia de ciclos secos y húmedos de hasta 3 años que a partir del año 1959 se hicieron más prolongados.

Los suelos predominantes en el área de estudio son argiudoles típicos, bien drenados y profundos que pertenecen a la Unidad Cartográfica Simple: Serie Esperanza (ESP).

La columna hidrogeológica local comprende: un basamento acuícludo formado por arenas y arcillas de origen marino, correspondiente al techo de la Formación Paraná (Mioceno); un acuífero semiconfinado, compuesto por arenas finas y medianas, de origen fluvial de alrededor de 24 m de espesor medio, pertenecientes a la Formación Ituzaingó, también denominadas "Arenas Puelches" (Plioceno); un manto semiconfinante o acuitardo, formado por limos y arcillas de aproximadamente 3 m de espesor promedio de la Formación Pampa (Pleistoceno) y un acuífero freático compuesto por limos, arcillas y loess de origen eólico, palustre y lacustre de aproximadamente 15 m de potencia pertenecientes a la parte superior de la Formación Pampa (Figura 2).

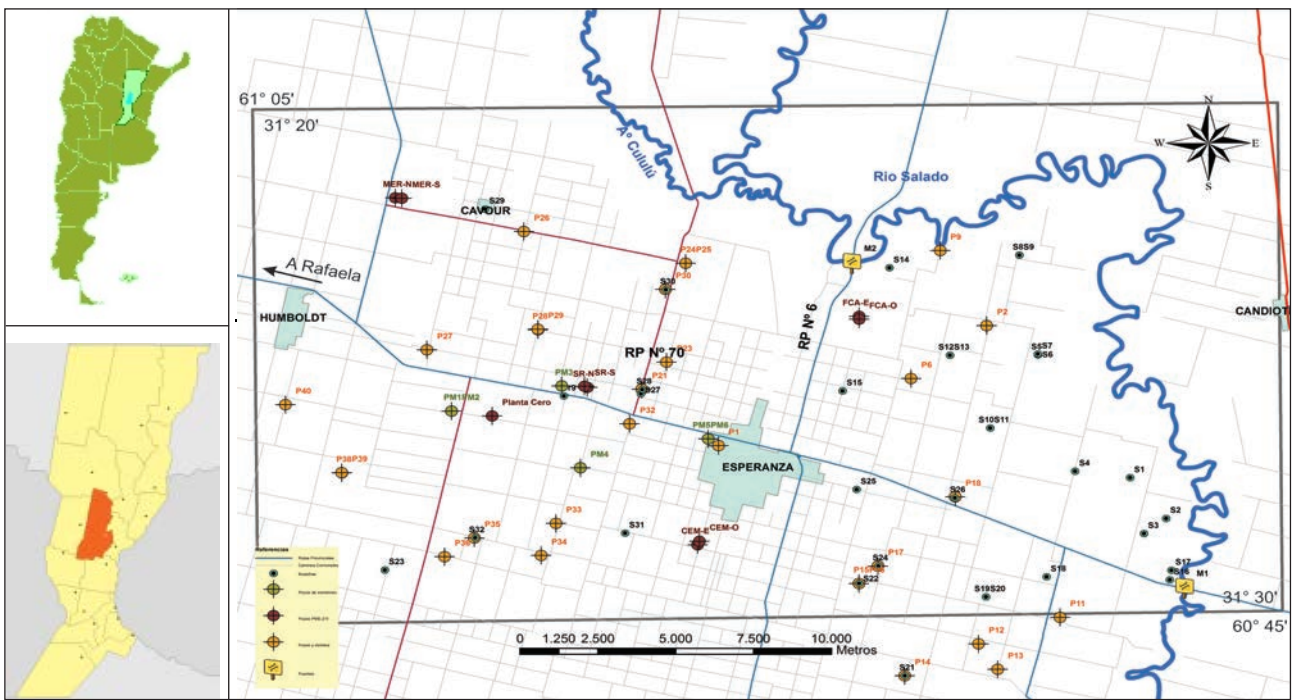


Figura 1. Ubicación del área de estudio y puntos de observación

El comportamiento hidráulico es de tipo multiunidad. Los parámetros hidráulicos formacionales de las Unidades Hidrogeológicas informados en estudios

previos (Fili et al, 1999; Tujchneider et al, 2005) se presentan en la Tabla 1.

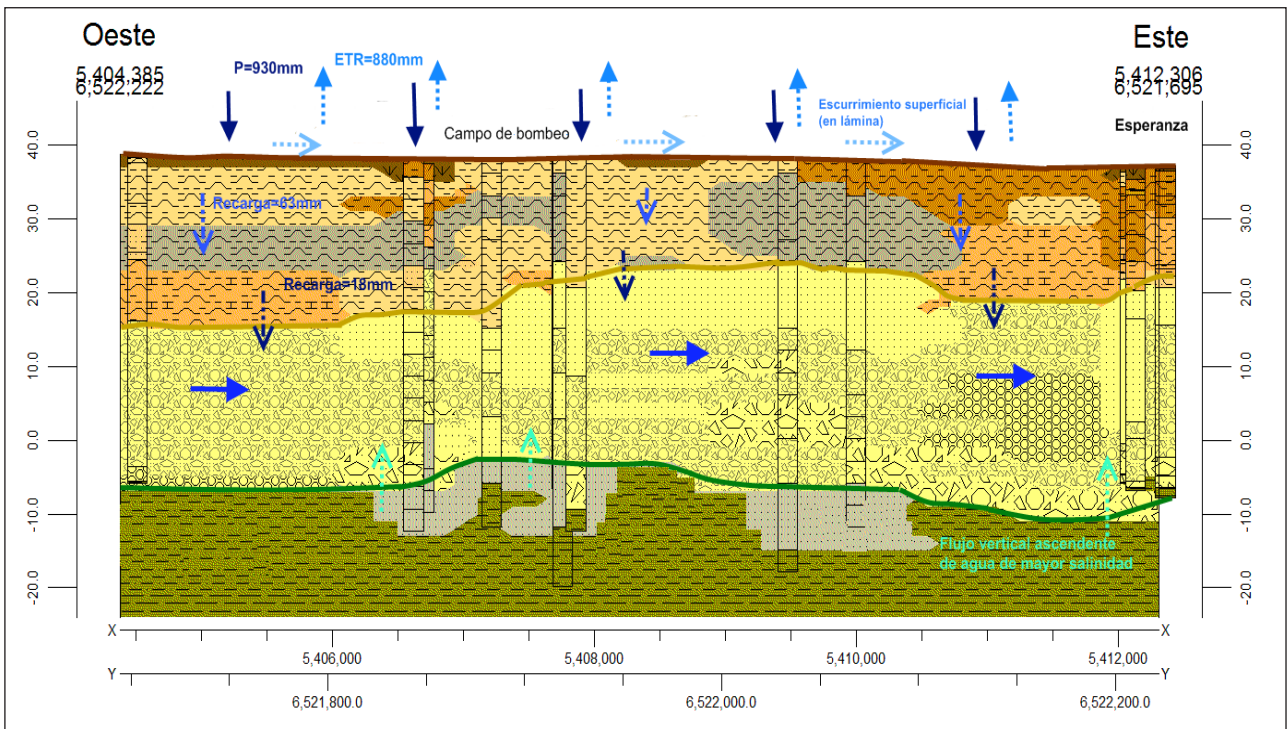


Figura 2. Modelo conceptual de funcionamiento del sistema hídrico subterráneo (Fili et al, 1999; Paris, 2010)

El acuífero libre es recargado localmente por las precipitaciones, mientras que el acuífero semiconfinado recibe recarga local proveniente del acuífero libre suprayacente y recarga regional (D'Elia et al, 2005). Ambos acuíferos poseen un flujo regional de agua subterránea con dirección oeste-

este y descarga en el río Salado; particularmente el acuífero semiconfinado descarga además en el valle del río Paraná. Cabe destacar que no se conoce exactamente el límite oeste del acuífero semiconfinado, como así tampoco las áreas ni los volúmenes de recarga al mismo.

Tabla 1. Parámetros hidráulicos formacionales

Unidad Hidrogeológica	T (m ² /día)	S	K _h (m/día)	K _v (m/día)
Pampeano	150	0.05	10	5
Acuitardo	1.5*10 ⁻²	0.006	5*10 ⁻³	5*10 ⁻³
Arenas Puelches	600-950	10 ⁻⁴	30	30

Existen flujos descendentes y ascendentes a través del acuitardo, en función de las relaciones hidráulicas entre los acuíferos, por lo que la extracción de agua del acuífero semiconfinado induce la recarga desde el acuífero libre y la afluencia lateral desde áreas circundantes del propio acuífero. Estimaciones recientes indican que el aporte del acuífero libre a través del acuitardo es del orden de 8 mm/año lo que representa 4,2 hm³ anuales (D'Elia, 2013).

Fedele (2013) estimó la descarga del acuífero en el río Salado por medio de la descomposición de hidrogramas entre la sección RPN°6 y la estación hidrométrica Recreo RPN°70, ubicada aguas abajo de la sección RPN°6. Determinó que el caudal base promedio en la sección RPN°6 es del orden del 30% del caudal base promedio en la estación hidrométrica Recreo RPN°70.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

La información hidrometeorológica disponible consistió en registros diarios de precipitaciones de la estación pluviométrica Esperanza de la Dirección General de Comunicaciones de la Provincia de Santa Fe y registros diarios de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento para la estación meteorológica automática de la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la UNL, Esperanza; para el período 2002-2011.

Los parámetros capacidad de campo y punto de marchitez permanente correspondientes al suelo argiudol típico se obtuvieron por pruebas de laboratorio y ecuación de retención hídrica realizados en estudios previos, con los que se adoptó un valor de agua útil de 188 mm. La condición hidrológica de los suelos del área se estableció en estudios previos (D'Elia et al, 2002) y Pusineri & Arbuet en: D'Elia (2013) distinguieron los usos del suelo por medio del procesamiento de la Imagen Landsat 7TM Path Row 22782 del 28-03-2011.

Los registros de niveles de agua subterránea con los que se trabajó corresponden a 14 pozos de monitoreo: PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6, SRE-N, SRE-S, MER-N, MER-S, FCA-E, FCA-O, CEM-E y CEM-O. En los 6 primeros se realizaron mediciones manuales de profundidad del agua subterránea con sonda Solinst Modelo 101. En los 8 últimos se instalaron registradores continuos de nivel de agua subterránea por transducción de presión Global Water WL 16 Level Logger. La profundidad de los pozos PM1, PM5, SRE-S, MER-S, FCA-O y CEM-O varía entre 10 y 20 m, por lo que se

obtuvo información correspondiente a la primera capa acuífera alojada en la Formación Pampa. Los pozos de monitoreo PM2, PM3, PM4, PM6, SRE-N, MER-N, FCA-E y CEM-E tienen una profundidad que varía entre 30 y 40 m y la información obtenida es representativa del segundo nivel acuífero alojado en la Formación Ituzaingó. El período y paso de tiempo de los registros de niveles de agua subterránea obtenidos de los pozos de monitoreo se presentan en la Tabla 2.

Se realizaron determinaciones de Cl⁻ y NO₃⁻ de agua subterránea colectada en los pozos de monitoreo PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6, para distintas fechas en el período 2003-2005 por el laboratorio de la empresa concesionaria de servicios sanitarios en ese momento (actualmente ASSA). Se consideraron las concentraciones de Cl⁻ de las muestras de agua de lluvia colectadas en la estación meteorológica de la FICH-UNL, Santa Fe, para el período 2000-2006 (D'Elia et al, 2008) y se completó esta información con determinaciones de Cl⁻ de las muestras de agua de lluvia de la misma estación, colectadas en el período 2007-2011 y analizadas en el Laboratorio de Química Ambiental (LQA) de la FICH-UNL.

Durante los meses de marzo y abril de 2011, se realizó un censo de pozos, perforaciones y molinos en el área de estudio. En 38 sitios se midieron manualmente profundidades de nivel de agua subterránea y en 33 se determinaron in-situ temperatura, pH, CE y se tomaron muestras de agua subterránea. En el LQA-FICH-UNL se determinaron Cl⁻ y NO₃⁻. En noviembre de 2012 se realizó otro censo de pozos en los que se midieron niveles de agua subterránea en 24 de los pozos censados en marzo-abril de 2011 y en 10 nuevos pozos ubicados en la margen izquierda del río Salado.

El trazado de las curvas isofreáticas se realizó en una primera instancia a mano alzada y luego utilizando el software Surfer 8.05 (©2004 Golden Software).

El Centro de Informaciones Meteorológicas de la FICH-UNL proporcionó la serie de caudales medios diarios (Q_{md}) del río Salado en la estación hidrométrica Recreo RPN°70 para el período 1994-2012, con la que se realizó un análisis estadístico univariado. Se adoptó un valor de Q_{md} para esta estación hidrométrica para el período octubre-noviembre 2008, como representativo del flujo base, ya que corresponde a un período de aguas bajas, inicio de una época de sequía extrema en la llanura pampeana. Con ese valor se estimó Q_{md} para la sección RPN°6 teniendo en cuenta el porcentaje obtenido de estudios previos (Fedele, 2013) y se obtuvo el flujo base entre ambas estaciones (descarga del acuífero) por diferencia.

Tabla 2. Registros de niveles de agua subterránea.

Pozo	Fecha/Período de registro	Paso de tiempo
PM1, PM2, PM3, PM4	09/2002, 04-09-10-12/2003, 04-09/2004, 05/2005, 04-06/2006	
PM5	08/2002-08/2011	d/s
PM6	08/2002-08/2011	d/s
SRE-N	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2010	h/d
SRE-S	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
MER-N	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
MER-S	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
FCA-E	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
FCA-O	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
CEM-E	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
CEM-O	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d

d: diario; s: semanal; h: horario

Se realizaron muestreos de fauna subterránea en noviembre de 2011 y septiembre de 2012. En el primero de ellos se muestrearon 4 pozos de entre 10 y 15 m de profundidad que captan agua del primer nivel acuífero: S12, S13 y S27 corresponden a dos tambos y S33 a una granja de cría de pollos. En el segundo, se muestrearon 3 pozos de explotación de ASSA que captan agua del segundo nivel acuífero (P3, P30, P34) y un pozo de abastecimiento del Campo Experimental FCA de aproximadamente 15 m que extrae agua del primer nivel acuífero. Estos muestreos se realizaron filtrando entre 500 y 800 litros de agua bombeada de los pozos a través de una malla de 25 μm de apertura y el volumen filtrado fue concentrado a 100 cm^3 . Los análisis de la fauna subterránea se realizaron en el Laboratorio de Plancton del Instituto Nacional de Limnología (INALI-UNL-CONICET). Dada la escasez de organismos, se analizó bajo microscopio el total de la muestra. En todos los casos se determinaron parámetros in situ como temperatura, pH, CE y OD y Cl^- y NO_3^- en el LQA-FICH-UNL.

Todos los puntos de observación se georreferenciaron y acotaron con GPS Diferencial Geodésico RTK Leica 1200. En la Figura 1 se presenta la ubicación de los mismos.

3.1. Métodos de estimación de recarga utilizados

Para la evaluación de la recarga al acuífero libre se consideró el período 2002-2011 y se utilizaron tres metodologías: balance de agua a nivel de suelo, fluctuaciones de niveles freáticos (Healy & Cook, 2002) y balance de masas de cloruros (Custodio & Llamas, 1983).

Para aplicar la primera metodología, se estimó la evapotranspiración potencial (ETP) por el método de Thornthwaite & Mather (1955) y por el método de FAO Penman-Monteith (FAO, 2006), este último utilizando el software CROPWAT 8.0 para Windows

(© FAO, 2009). El escurrimiento superficial (ESC) se estimó por el método del Número de Curva (U.S. Soil Conservation Service, 1966).

En la aplicación del método de las fluctuaciones de los niveles freáticos se utilizaron valores de coeficiente de almacenamiento $S=0,05$, informado en estudios previos (Fili et al, 1999; Tujchneider et al, 2005) y $S= 0,021$ que surge del análisis de las curvas de agotamiento de los niveles freáticos (D'Elia, 2013).

Para este estudio, se utilizaron ambos métodos con un paso de tiempo diario y mensual que luego se integró mensual y anualmente.

Para el planteo del balance de cloruros, se calculó la concentración promedio de Cl^- de la precipitación con los datos existentes para el período 2000-2012. Se consideró que la concentración de Cl^- del ESC era la misma que la de la precipitación y se estimó la concentración promedio de Cl^- del agua subterránea sin tener en cuenta la correspondiente a las muestras de agua que presentaron concentraciones de NO_3^- superiores a 15mg/L, ya que esto podría sugerir un inicio de contaminación y una afectación en los valores naturales de distintos elementos en el agua subterránea. Finalmente se compararon los resultados obtenidos por las diferentes metodologías.

Se contó la Encuesta Ganadera por Localidad del Departamento Las Colonias del período 07/2012-06/2013 (IPEC, 2013) para estimar las demandas de agua para ganado y con estudios de Perez et al. (2014) para estimar los volúmenes de agua extraídos del acuífero para abastecimiento de las localidades del área.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de las precipitaciones

Del análisis de las precipitaciones para el período 2002-2011, surge que la precipitación media anual resultó 1167mm y que se presentaron años húmedos:

2002-2003, 2004-2005 y 2006-2007, años secos: 2007-2008 y 2008-2009 y años típicos: 2003-2004, 2005-2006, 2009-2010 y 2010-2011. Las mayores precipitaciones medias mensuales se registraron en los meses de noviembre, diciembre, febrero, marzo y abril (superiores a 100mm) y las menores durante los meses de mayo, junio, julio y agosto (inferiores a 30mm).

4.2. Análisis espacio-temporal de los niveles de agua subterránea

Las curvas isofreáticas para marzo-abril de 2011 se obtuvieron considerando una interpolación por kriging y un modelo de variograma lineal sin

pepita y se trazaron con una equidistancia de 2,5 m (Figura 3). Los niveles freáticos se encontraron entre 44 y aproximadamente 13 m de cota IGN, con un gradiente de la superficie potenciométrica del orden del 1‰ en las áreas planas y de 2‰ en las cercanías del río Salado. El diseño de las curvas equipotenciales se muestra aproximadamente paralelo, con orientación norte-sur, por lo que el escurrimiento subterráneo muestra una dirección predominante oeste-este, corroborando la descarga en el río Salado. (D’Elia, 2013). Se observó que para el mes de noviembre de 2012 la configuración de las curvas isofreáticas era similar a la de 2011 y que el río Salado recibió aporte subterráneo desde ambos márgenes (Fedele, 2013).

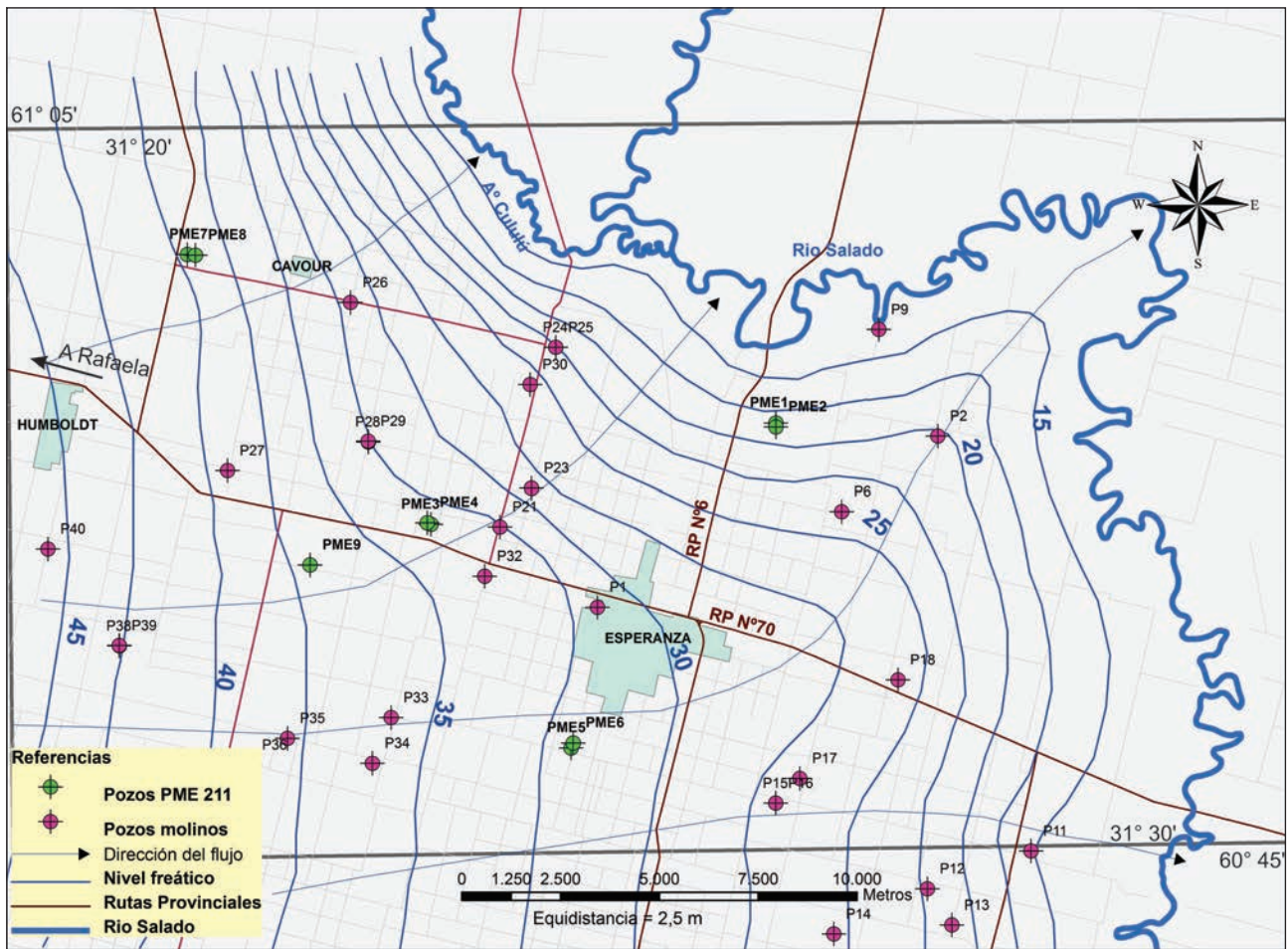


Figura 3. Curvas isofreáticas marzo-abril 2011.

Se evidenció un comportamiento similar en las fluctuaciones de los niveles de los acuíferos libre y semiconfinado con ciclos bianuales y trianuales de oscilaciones piezométricas correspondientes a los períodos: 10/2002-10/2004; 11/2004-07/2006; 08/2006-10/2009 y 11/2009-08/2011. Las variaciones de niveles freáticos son del orden de los 10 m en términos absolutos y el retardo en la respuesta del acuífero libre a las entradas por precipitación es de aproximadamente 1 mes, corroborado por el

resultado del análisis entre las series de P-P_m acum y las variaciones de los niveles freáticos (D’Elia, 2013). Para la evaluación de la recarga a la primera capa acuífera se consideraron las variaciones de niveles registradas en el pozo de monitoreo PM5 debido a que posee un período de registro más extenso (2002-2011). La variación de estos niveles, conjuntamente con las precipitaciones mensuales se observan en la Figura 4.

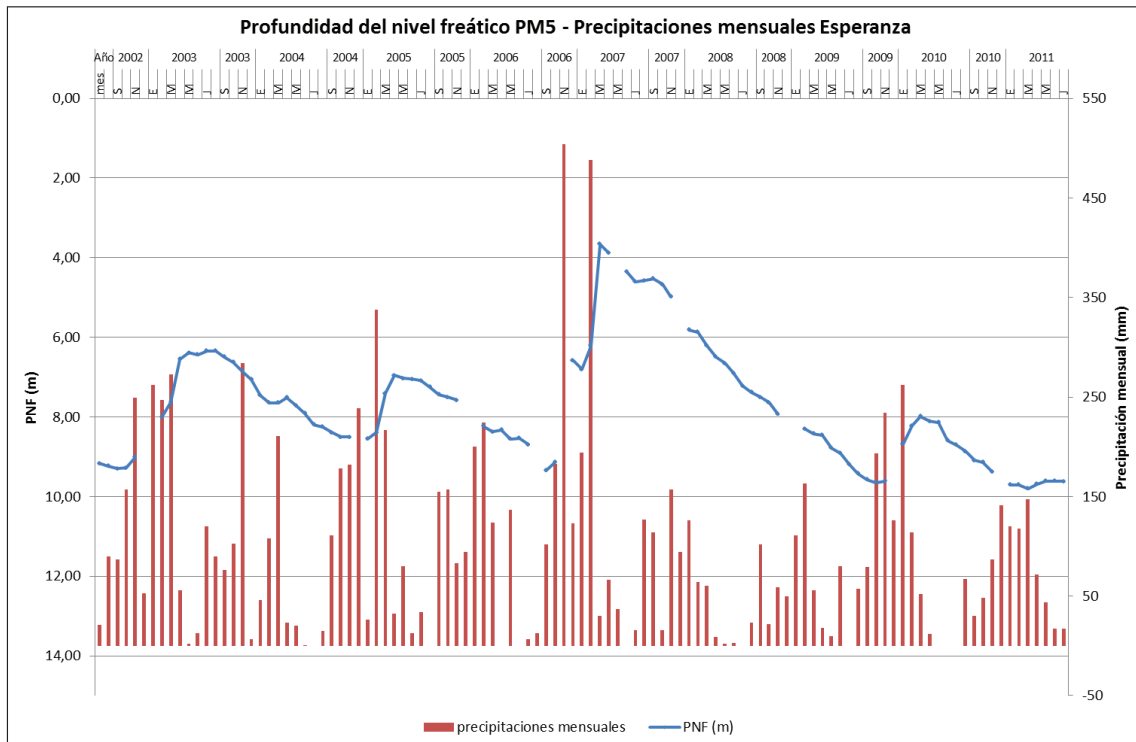


Figura 4. Niveles de agua subterránea vs precipitaciones mensuales

4.3. Estimación de la recarga

Balance de agua

Los resultados del balance de agua realizado utilizando la metodología de Thornthwaite para la estimación de la ETP y el método de Número de Curva para la estimación ESC, indican que en el período de análisis se produjeron 12 eventos de recarga de 1 a 4 meses de duración, con láminas de recarga de 7 a más de 175 mm. Si se considera la estimación de ETP por el método de FAO Penman-

Monteith y el método de Número de Curva para la estimación ESC, los eventos de recarga fueron 8, todos ellos de un mes de duración y con montos de 3 a 200 mm (Figura 5).

En términos medios anuales la recarga en tránsito resultó 101,9mm (con ETP estimada por Thornthwaite) y 47,6 mm (con ETP estimada por FAO Penman-Monteith) (Tabla 3), lo que representarían volúmenes de agua de 51 hm³ y 24 hm³ respectivamente. EXC representa el exceso hídrico anual resultante del balance de agua realizado.

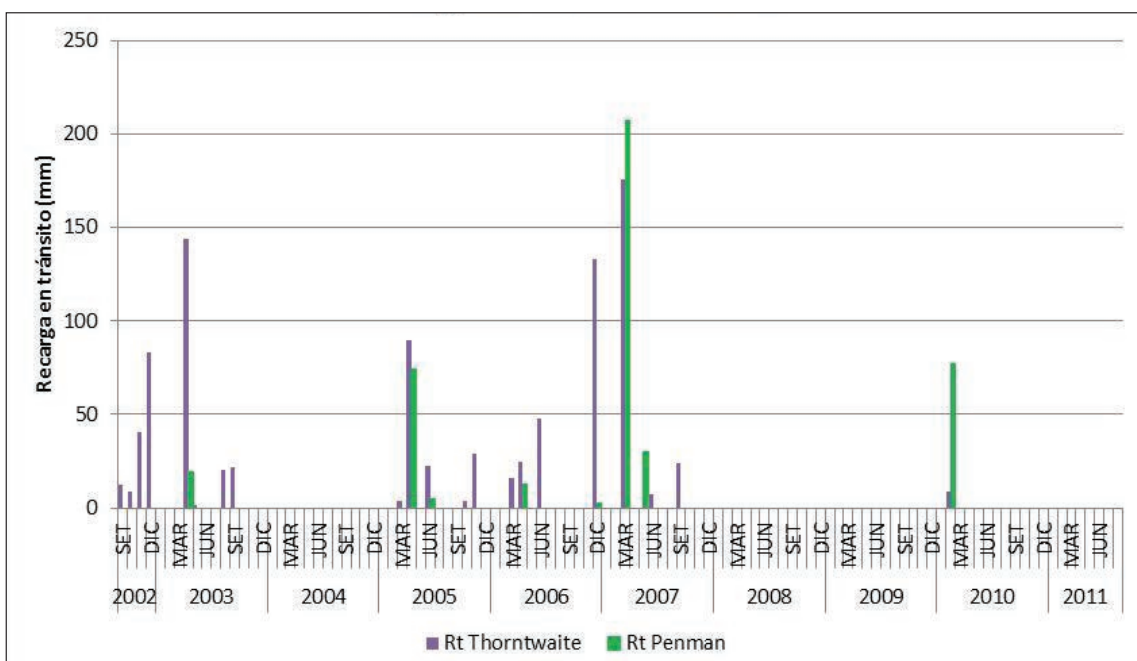


Figura 5. Recarga en tránsito estimada

Tabla 3. Resultados del balance de agua y recarga en tránsito en términos anuales y promedios anuales

Método de estimación de ETP	Año	P anual (mm)	EXC (mm)	ESC (mm)	Rt (mm)	% P
Thornthwaite	2002-2003	1.627,0	615,5	305,1	310,5	19,1
	2003-2004	969,0	166,9	144,9	21,9	2,3
	2004-2005	14.65,0	336,1	219,7	116,4	7,9
	2005-2006	1.181,0	280,4	159,3	121,1	10,3
	2006-2007	1.756,0	771,0	455,9	315,1	17,9
	2007-2008	772,0	73,8	50,2	23,6	3,1
	2008-2009	694,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2009-2010	1.129,0	52,0	43,3	8,7	0,8
	2010-2011	853,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Promedio	1.160,7	255,1	153,2	101,9	
FAO Penman-Monteith	2002-2003	1.627,0	93,9	74,6	19,4	1,2
	2003-2004	969,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2004-2005	1.465,0	149,6	70,6	79,0	5,4
	2005-2006	1.181,0	42,2	29,5	12,7	1,1
	2006-2007	1.756,0	663,9	423,8	240,1	13,7
	2007-2008	772,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2008-2009	694,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2009-2010	1.129,0	120,1	43,3	76,7	6,8
	2010-2011	853,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Promedio	1.160,7	118,9	71,3	47,6	

Fluctuaciones de niveles

Para la aplicación de este método se decidió utilizar la serie de niveles freáticos del pozo PM5 ya que era la serie más extensa y considerada representativa del comportamiento de los niveles freáticos del área. Se completaron los datos faltantes de esta serie con valores obtenidos de un análisis estadístico de correlación entre ésta y la serie de diferencias acumuladas entre la precipitación y la precipitación media de toda la serie ($P-P_m$ acum), así como con las series de profundidad de niveles de agua subterránea de otros pozos de monitoreo (D'Elia, 2013).

Como resultado de la aplicación de esta metodología se presentaron 13 eventos de recarga que varían entre 1 y 4 meses de duración, con láminas de 4 a 75 mm si se considera un $S=0,021$ y de 9 a 175 mm si se considera $S=0,05$ (Figura 6).

En términos medios anuales la recarga real estimada resultó 98,9 mm con $S=0,05$ y 41,5 mm con $S=0,021$ (Tabla 4), lo que representaría 49,5 hm³ y 20,7 hm³ respectivamente.

Tabla 4. Recarga real en términos anuales y promedios anuales

Año	Panual (mm)	R (mm) S=0,05	R (%P)	R (mm) S=0,021	R (%P)
2002-2003	1.627,0	224,2	13,8	94	5,8
2003-2004	969,0	15,2	1,6	6,4	0,7
2004-2005	1.465,0	104,6	7,1	43,9	3,0
2005-2006	1.182,0	20,1	1,7	8,4	0,7
2006-2007	1.756,0	338,2	19,3	142,1	8,1
2007-2008	772,0	22,7	2,9	9,5	1,2
2008-2009	694,0	16,8	2,4	7	1,0
2009-2010	1.129,0	122,8	10,9	51,6	4,6
2010-2011	853,0	25,6	3,0	10,7	1,2
Promedio	1160,7	98,9		41,5	

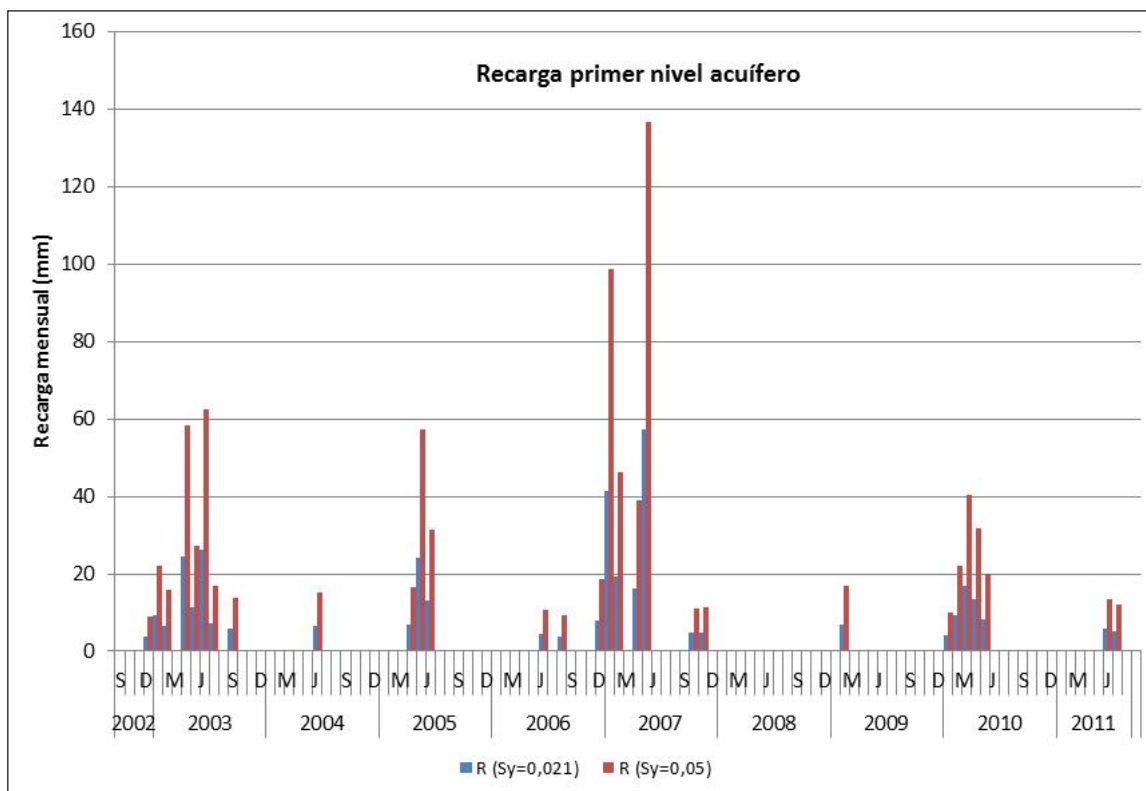


Figura 6. Recarga real estimada

Balace de cloruros

Como se vio anteriormente la precipitación media anual para el período de análisis resultó 1160,7 mm, se adoptó un escurrimiento superficial medio anual de 112,2 mm, la concentración media de Cl⁻ de la precipitación resultó 0,674 mg/L y la del agua del primer nivel acuífero 19,1 mg/L. De esta manera el valor de recarga anual promedio resultó 36,8 mm lo que representaría 18,4 hm³.

4.4. Comparación de los resultados

Como se mencionó anteriormente, para minimizar la incertidumbre en la estimación de la recarga a los acuíferos, se sugiere que la aplicación y comparación de diferentes procedimientos metodológicos. Los valores de recarga local promedio anual estimada por los diferentes métodos para el período de análisis en el área de estudio se sintetizan en la Tabla 5.

Tabla 5. Recarga local promedio anual estimada

Método de estimación		Recarga promedio anual
Balance de agua	ETP estimada por Thornthwaite	101,9 mm=51 hm ³
	ETP estimada por FAO Penman-Monteith	47,6 mm=24 hm ³
Fluctuaciones de niveles	S=0,05	98,9 mm=49,5 hm ³
	S=0,021	41,5 mm=20,7 hm ³
Balance de cloruros		36,8 mm=18,4 hm ³

Cabe recordar, que el método de balance de agua a nivel de suelo estima una recarga potencial o en tránsito, o sea la lámina de agua que sale de la zona del suelo, viaja por la zona intermedia de la zona no saturada y que puede alcanzar la zona saturada del acuífero. El método de las fluctuaciones de los niveles freáticos estima una recarga real, es decir la que realmente produce un ascenso del nivel freático, aumentando las reservas de agua subterránea.

Para este estudio, se considera que los resultados obtenidos por el método de balance de agua con

la estimación de la ETP por el método de FAO Penman-Monteith son más ajustados ya que el método tiene en cuenta los efectos de la velocidad del viento y la humedad relativa en el proceso de evapotranspiración, mientras que la estimación de ETP por el método de Thornthwaite, solo considera la temperatura.

Por otra parte, se considera que el resultado de la estimación de la recarga a los acuíferos por el método de las fluctuaciones de niveles freáticos con S=0,021, obtenido del análisis de las curvas de agotamiento

de los niveles freáticos en el área de estudio (D'Elia, 2013), es más ajustado a las características locales del sistema hidrogeológico que el valor de $S=0,05$ de representación regional.

Finalmente la recarga estimada por el balance de cloruros representa un valor promedio anual para toda el área de estudio

En la Tabla 5 se resaltan los resultados considerados más ajustados.

4.5. Estimación de la descarga de acuíferos

El análisis estadístico univariado de la serie de Q_{md} que pasaron por la sección RPN°70, indica que los valores máximos y mínimos observados en el período 1994-2012, fueron de 3954 m³/s y 2,21 m³/s respectivamente, la media resultó 150 m³/s y la mediana 50,7 m³/s. Además, aproximadamente el 2% de los Q_{md} observados fueron inferiores a 6 m³/s y corresponden a los años 2000 y 2012, período que comprende el del presente estudio. Particularmente en el año 2009, año de sequía extrema en la llanura pampeana, se registraron caudales del orden de 5 m³/s. Por lo tanto, si se considera como caudal base un Q_{md} de 5 m³/s en la estación hidrométrica RPN°70, el caudal base en la sección RPN°6 resultaría 3,85 m³/s y consecuentemente, el aporte subterráneo hacia el río sería 1,15 m³/s. De este aporte subterráneo, la mitad (0,575 m³/s) provendría de la margen derecha del río Salado, lo que correspondería a un volumen anual de descarga de 18,1 hm³. Es de destacar que en este tramo el río recibe efluentes industriales durante todo el año a través de canales pluviales y tuberías cuyo caudal fue estimado en forma preliminar en 0,5 hm³ por año.

4.6. Estimación de las demanda de agua subterránea

El acuífero libre es aprovechado por los establecimientos rurales para consumo humano,

riego y abrevado de ganado, mientras que el acuífero semiconfinado es aprovechado tanto en el ámbito rural como para consumo humano e industrial.

Según la Encuesta Ganadera por Localidad del Departamento Las Colonias del período 07/2012-06/2013 (IPEC, 2013), existen en el área de estudio 40267 cabezas de ganado vacuno, 24763 son animales para ordeño y el resto para cría e invernada. Una primera estimación del consumo de agua del ganado arrojó un valor de 1,6 hm³ anuales, considerando una dotación de 50 l/día para el animal de cría e invernada y 150 l/día para la vaca de ordeño.

Como se mencionó anteriormente, la región se caracteriza por tener una alternancia de períodos húmedos y secos. En períodos húmedos, las precipitaciones alcanzan a cubrir los requerimientos de evapotranspiración de los principales cultivos, pero en épocas secas, el agua constituye uno de los principales limitantes para el desarrollo de los mismos y es por ello que los productores recurren a la técnica de riego suplementario con agua subterránea, para disminuir riesgos económicos. Sin embargo, no existe un registro de regantes en la región, por lo que no se cuenta con información de los volúmenes de agua subterránea utilizada para riego.

El volumen de agua extraído del acuífero semiconfinado para abastecimiento de agua de las localidades de Esperanza y Rafaela en el año 2013 fue estimado en 13,9 hm³ (Perez et al, 2014)

Es conocido que los establecimientos industriales de mayor envergadura de la región, además de utilizar agua proveniente de la red de agua potable, poseen perforaciones propias, pero no se conocen los volúmenes de agua subterránea extraídos.

4.7. Síntesis de los resultados obtenidos. Balance de agua del sistema acuífero

Una síntesis de las entradas (oferta) y salidas (demanda) para el planteo del balance de agua se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Entradas y salidas del sistema acuífero

	Acuífero libre	Acuífero semiconfinado
ENTRADAS = OFERTA	recarga local= 20,7 hm ³	recarga a través de la capa acuitarda= 4,2 hm ³
		recarga regional= s/e
SALIDAS ≈NATURAL + DEMANDA DE AGUA	flujo base= 18,1 hm ³ menos efluentes industriales= 0,5 hm ³	
	bebida ganado= 1,6 hm ³	
	consumo humano rural=s/d	
	vegetación freatófita= s/e	consumo humano urbano= 13,9 hm ³
		riego= s/d
industrias= s/d		

s/d= sin datos; s/e= sin estimar

Como entradas de agua al sistema acuífero (oferta) se consideraron: la recarga local al acuífero libre estimada por el método de fluctuaciones de niveles freáticos y la recarga a través de la capa acuitada hacia el acuífero semiconfinado, estimada en estudios previos. Como se mencionó anteriormente, no se conoce la recarga regional al acuífero semiconfinado.

Como salidas de agua del sistema acuífero se consideraron tanto las descargas naturales como las artificiales. Dentro de las salidas naturales se tuvieron en cuenta los requerimientos de agua de la vegetación freatofita, aunque aún no se cuenta con los resultados de estas estimaciones, y la descarga de los acuíferos libre y semiconfinado al río Salado, estimada a partir de los caudales de dos secciones del río. Se debe destacar que este volumen de descarga incluye el aporte de los efluentes industriales descargados en esa sección del río. Dentro de las salidas artificiales fueron considerados el volumen de agua extraído del acuífero semiconfinado para consumo humano en las áreas urbanas y el extraído tanto del acuífero libre como del semiconfinado para abrevado de ganado en el ámbito rural, ambos estimados previamente. Como se mencionó anteriormente no se cuenta con registros ni estadísticas oficiales de los volúmenes de agua subterránea utilizada por las industrias de la zona, para irrigación de los cultivos y para consumo

humano en el área rural, por lo que su estimación sería aventurada.

4.8. Identificación de ecosistemas dependientes del agua subterránea

Como resultado del primer muestreo de fauna subterránea, se registró la presencia de dos especies de Rotífera Monogononta (*Lecane bulla* y *Brachionus havanensis*), una de Cladocera Anomopoda (*Chydorus nitiludus*) y larvas de copépodos del estadio de copepoditos pertenecientes a especies no identificadas de los órdenes Cyclopoida y Harpacticoida. También se hallaron ejemplares de Acari Oribatida y un insecto Tysanura aunque la presencia de este último se considera podría ser consecuencia de la contaminación de la muestra. En una muestra se hallaron varios organismos de forma ovalada que se presume podrían ser protozoos contraídos o huevos de algún invertebrado no determinado. Cabe señalar que prácticamente todo el material hallado fue muy escaso, estando representado por un solo ejemplar de cada taxón identificado, aunque en el caso de los presuntos protozoos contraídos se hallaron 18 ejemplares en el volumen total de la muestra (Figura 7). En las muestras obtenidas del segundo muestreo no se encontraron organismos.

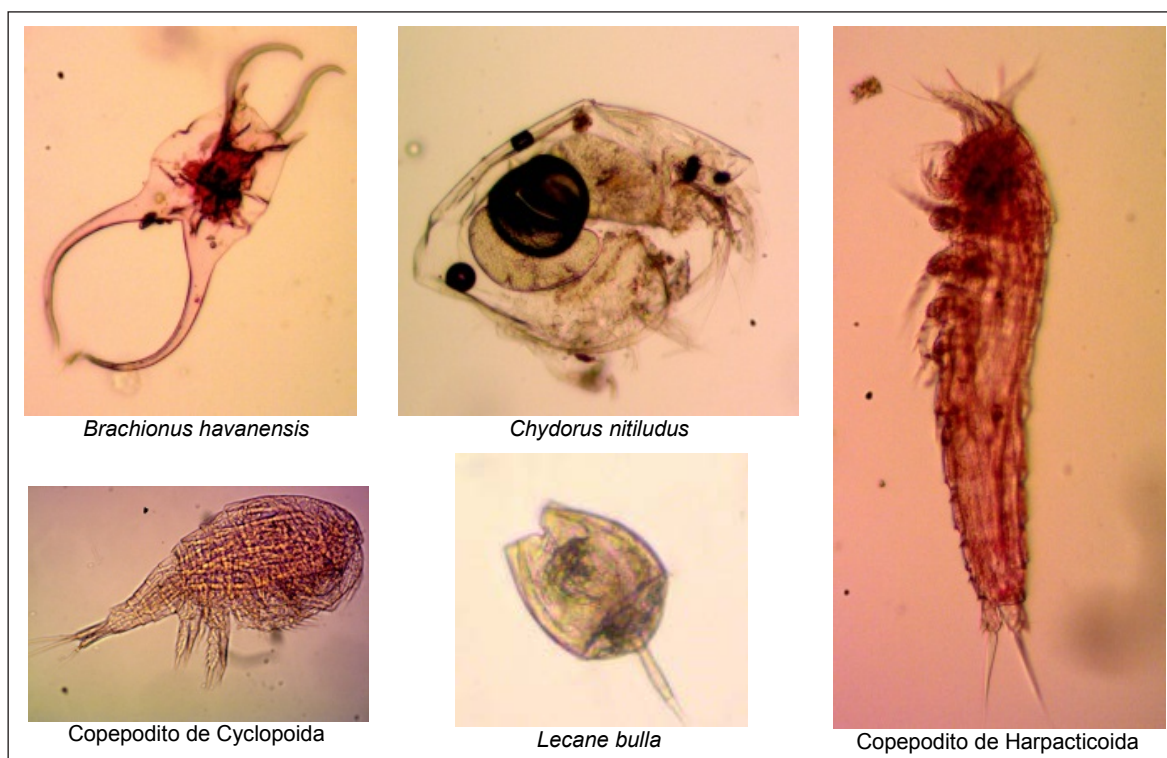


Figura 7. Organismos presentes en el agua subterránea

Finalmente, es de destacar que en el marco de proyectos de investigación del grupo al que pertenecen los autores de este trabajo, se están desarrollando estudios para analizar imágenes satelitales del año

2009, que corresponde a un período muy seco, de manera de distinguir los sectores que por su verdor se corresponderían con áreas irrigadas o con áreas con presencia de vegetación freatofita.

5. CONCLUSIONES

A simple vista, formular un balance de agua en un sistema hídrico parece una tarea sencilla. Sin embargo, es cierto que sólo algunos componentes de este balance como la precipitación y caudales de salida de una cuenca, pueden medirse y los otros deben ser estimados. Muchas veces no se dispone de mediciones suficientes y confiables y las estimaciones introducen incertidumbres. A pesar de ello es fundamental encarar investigaciones y avanzar en el conocimiento de los sistemas hídricos. En particular, el comportamiento de los sistemas hídricos subterráneos no es tan visible y es tarea de los hidrogeólogos visibilizarlos para poder gestionarlos.

En relación con la recarga al acuífero libre, se puede decir que el método de las fluctuaciones de los niveles freáticos proporciona una estimación de la recarga real, pues el ascenso del nivel freático se produce por la llegada de agua de recarga. Sin embargo, su confiabilidad está dada por la correcta selección del coeficiente de almacenamiento, que precisamente es un parámetro hidráulico formacional muy variable.

La recarga estimada por el método de balance de agua en la zona de evapotranspiración de las plantas, es una recarga potencial, representa el agua que sale de la zona del suelo pero que puede no alcanzar el acuífero; además requiere de la estimación de varias variables y parámetros, lo que introduce aún más incertidumbres. Finalmente el balance de cloruros proporciona una recarga promedio anual para un área determinada y es probable que se requiera mayor información distribuida en el espacio y tiempo.

Por ello se ha considerado como más ajustado el resultado obtenido por el método de fluctuaciones de los niveles freáticos con la consideración del valor de coeficiente de almacenamiento más representativo de las características hidrogeológicas locales. La utilización de las metodologías de balance de agua y balance de cloruros ha contribuido a corroborar la estimación de recarga realizada por el método de fluctuaciones de los niveles freáticos.

La descarga de los acuíferos ha sido estimada como el volumen de agua correspondiente al flujo base del río Salado en un tramo del mismo, considerando los caudales medios diarios de un período de aguas bajas (época de sequía).

En zonas rurales resulta difícil establecer con certeza qué volúmenes de agua son extraídos del acuífero libre y del acuífero semiconfinado para consumo humano y animal. Si bien el aprovechamiento del acuífero semiconfinado para agua potable es conocido, no se han podido establecer el volumen de agua extraída por industrias y por los productores agropecuarios con fines de riego en épocas secas. Se continúan estudios que permitirán distinguir áreas irrigadas y con vegetación freatófita a través del procesamiento y análisis de imágenes satelitales.

Finalmente, se ha identificado en forma preliminar la presencia de invertebrados en el ambiente subterráneo lo que constituye un avance sumamente importante en el conocimiento de estos ecosistemas en la región. La continuidad de las investigaciones permitirá evaluar la influencia de la litología y el uso del territorio sobre estas comunidades y eventualmente ser consideradas indicadores del estado del sistema hídrico subterráneo.

Se considera que los resultados obtenidos constituyen el punto de partida del diagnóstico que integra un plan de gestión del agua en el área de estudio, al cuantificar la oferta y demanda de agua contemplando a los ecosistemas y atendiendo al logro de la seguridad hídrica.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Dra. Ofelia Tujchneider por sus valiosos aportes, las Ing. Evangelina Fornari y Ana Laura Fedele por su colaboración en las tareas de campo; a las Ings. María Lina Pagliano y Lucía Virgilio por la realización de las determinaciones en laboratorio y a los Dres. Juan Paggi, Susana José de Paggi, Mónica Blarasín y Laura Tione por la realización de los muestreos y análisis de fauna subterránea.

7. REFERENCIAS

- Blarasín, M., Bedano, M., Tione, L. & Cabrera, A. 2007. Caracterización de un acuífero loésico e identificación preliminar de microinvertebrados: ecosistema y consideraciones ambientales. V Congreso Argentino de Hidrogeología. Actas: 409-421.
- Cook, P., Jolly, I., Walker, G. & Robinson, N. 2002. From Drainage to Recharge to Discharge: some time lags in Subsurface Hydrology. Preprint from Dubai International Conference on Water Resources and Integrated Management in the Third Milenium, Dubai, UAE, Feb. 2002, 23.
- Custodio, E. 1998. Recarga de los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero de España. Vol. 109-4: 329-346.
- Custodio E. & Llamas M.R. 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Tomo I. 2350pp.
- D'Elia, M., Pusineri, G. & Marano, R. 2002. CN parameter estimation using remote sensing and geographic information system. 29^o International Symposium on Remote Sensing of Environment. Versión CD. Buenos Aires.
- D'Elia, M., Tujchneider, O., Paris, M., Perez, M. & Aravena, R. 2005. Técnicas isotópicas en la caracterización de sistemas de flujo subterráneo

- en Esperanza y Paraná, Argentina. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*. Vol.5: 31-38.
- D'Elia M., Tujchneider O., Paris M., y Perez M. & Gervasio S. 2008. Groundwater recharge assessment using environmental tracing methods. 5th International Conference on Tracers and Tracing Methods-Tracer 5. Tiradentes, Brasil Noviembre de 2008.
- D'Elia, M. 2013. Sistemas geohidrológicos en áreas de llanura. Identificación de mecanismos y cuantificación de recarga a los acuíferos. Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas (Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto). 251pp.
- FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Publicación No 56 de la Serie Riego y Drenaje. 298pp.
- Fedele A.L., 2013. Descarga de acuíferos en áreas de llanura. Informe Final Cientibeca Universidad Nacional del Litoral. 45. Inédito
- Fili, M., Tujchneider, O., Perez, M., Paris, M. & D'Elia M. 1999. Estudio del sistema de aguas subterráneas en el área de Esperanza-Humboldt y zona de influencia. Servicio Especializado de Asistencia Técnica. Convenio Aguas Provinciales de Santa Fe y Universidad Nacional del Litoral. Informe Final.
- Healey, R. & Cook, P. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* Vol 10 Number 1: 91-109.
- IPEC, 2013. Encuesta Ganadera 2013. En: <http://www.santafe.gov.ar/index.php/web/guia/estadistica>
- Lerner, D., Issar, A. & Simmers, I. 1990. Groundwater Recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. Heinz Heise, International Contributions to Hydrogeology, Vol 8: 345.
- Panigatti, J. 1986. Consideraciones sobre el clima del centro-oeste de la provincia de Santa Fe. EEA INTA Rafaela. Bol. Int. Divulgaciones. Nro. 15: 29.
- Paris M. 2010. Métodos estadísticos multivariados aplicados en Hidrología Subterránea. Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas (Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto): 173.
- Perez M., Tujchneider, O., Paris, M. & D'Elia, M. 2014. Sustainability indicators of groundwater resources in the central area of Santa Fe province, Argentina. *Environmental Earth Sciences*. DOI 10.1007/s12665-014-3181-1.
- Samper, F. J. 1997. Evaluación de la recarga por lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero de España*. Vol. 109-4: 347-370.
- Scanlon, B., Healy, R. & Cook, P. 2002. Choosing appropriate techniques to quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. Vol. 10, Number 1: 18-39.
- Sharma, M. 1989. Groundwater Recharge. *Proceedings of the Symposium on Groundwater Recharge* (ed.) Rotterdam: Balkema: 323.
- Simmers, I. 1998. Groundwater recharge: an overview of estimation `problems´ and recent developments. In: Robins N.S. (ed.) *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability*. Geological Society, London, Especial Publication, 130: 1-5.
- Sophocleous, M. 1997. Managing Water Resources Systems: Why "safe yield is not sustainable. *Groundwater*. Vol 35 (6), pp. 561.
- Thornthwaite, C. & Mather, J. 1955. *The Water Balance*. Publications in Climatology. Volume VIII. Number 1. Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology. Centerton, New Jersey: 104.
- Tujchneider, O., Paris, M., Perez, M. & D'Elia, M. 2005. Singularidad constitutiva de sistemas geohidrológicos de llanura y la gestión de los recursos hídricos subterráneos. *Revista latinoamericana de Hidrogeología*. Vol.5: 117-121.
- U.S. Soil Conservation Service, 1966. Diseño de presas pequeñas. Bureau of Reclamation: 639.
- Walker, G., Cook, P. & Gilfedder M. 2001. Recharge/ Discharge determination. Australian Groundwater School. *Fundamentals of groundwater sciences, technology and management*. Vol.2 – Technology. Centre for Groundwater Studies: 377-412.