

Explotación Intensiva y Minería de Agua Subterránea



RAHi
REVISTA ARGENTINA DE HIDROLOGÍA

Edición 1

Año 2022

ISSN 2953-4208



Organismo Editor Responsable

Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Argentino

Maipú 645 1^{er} piso

(C1006ACG) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Tel. 011 4322 2820 / 4328 4078

E-mail aih.grupoargentino@gmail.com; revista.argentina.hidrogeologia@gmail.com

Editorial

Ediciones Amerindia

Av. J. D. Perón 1147

(6300) Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

Tel. 02954 410315

E-mail info.edicionesamerindia@gmail.com

Foto de tapa

Geól. Rubén Eduardo Ottonello (año 2018). Obtenida al finalizar la construcción del Pozo “Parque de la Juventud” en la ciudad de La Rioja. De fondo el Monumento a Facundo Quiroga, símbolo del Federalismo. Equipo: cámara Olympus X-43 (Zoom óptico 5x). Modificada digitalmente para armonía de diseño por Guillermo Cardoso.

Logo

Logo y diseño de tapa de *Guillermo Cardoso*

Sitio Web AIH Grupo Argentino y Revista Argentina de Hidrogeología

Gestión documental RAHi *Noella Hurtado Viggiano*

REVISTA ARGENTINA DE HIDROGEOLOGÍA

CUERPO EDITORIAL

Editor responsable

Dr. Lic. Roberto Esteban Miguel

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

revista.argentina.hidrogeologia@gmail.com

Editora asociada

Dra. Lic. Corina Iris Rodríguez

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

corodri@fch.unicen.edu.ar

Comité editor

Dr. Geól. Carlos Juan Schulz

Universidad Nacional de La Pampa

Dr. Geól. Daniel Emilio Martínez

Universidad Nacional de Mar del Plata

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Dra. Geól. Verónica Rocha Fasola

Universidad Nacional de Salta

Agradecimientos

Desde el comité editor se agradece la colaboración desinteresada del *Dr. Lic. Leandro Rodrigues Capitulo* (Universidad Nacional de La Plata y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas), *Dra. Ing. Marcela Pérez* (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral), *Dra. Lic. Rosario Soledad Barranquero* (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas); *Geól. Esteban Tálamo* (Universidad Nacional de Ctmamarca) y *Dr. Lic. Víctor Alejandro Ruíz de Galarreta* (Docente Retirado Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires)

A las empresas *CONHIDRO* y *ANDINA PERFORACIONES*, quienes financiaron el diseño del logo, manual de marca y diseño de tapa de la Revista Argentina de Hidrogeología.

JUNTA DIRECTIVA
ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE HIDROGEOLOGÍA
GRUPO ARGENTINO

PRESIDENTE

Dr. Eduardo Kruse

VICEPRESIDENTE

Dra. Cristina Dapeña

SECRETARIA

Lic. María Josefa Fioriti

TESORERO

Dr. Santiago Perdomo

VOCALES

Dr. Roberto Esteban Miguel
Dra. María Verónica Rocha Fasola
Mag. Andrea Isabel Valladares
Dr. Carlos Juan Schulz

REVISTA ARGENTINA DE HIDROGEOLOGÍA

OBJETIVOS

La Revista Argentina de Hidrogeología (*RAHi*) es una publicación desarrollada desde el *Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Argentino (AIH-GA)* y el apoyo de investigadores de Universidades e Institutos de Ciencia y Técnica de Hispanoamérica que abordan la temática hidrogeológica.

La Revista tiene por objetivo publicar investigaciones científicas y documentos técnicos vinculados al quehacer hidrogeológico, con énfasis en las diferentes regiones de Argentina.

Los aportes podrán ser teóricos, metodológicos o aplicados, por ejemplo, a través de investigaciones empíricas o estudios de caso, que permitan avanzar en el conocimiento de la hidrogeología, su estudio y la aplicación de conocimientos.

TEMÁTICA

Los artículos publicados se enmarcarán en una línea temática establecida por la Junta Directiva de la AIH Grupo Argentino para cada número de la revista para lo cual se realizarán invitaciones especiales a investigadores, docentes y técnicos del quehacer hidrogeológico nacional. No obstante, el Comité Editorial ocasionalmente evaluará la apertura a números abiertos para la recepción de trabajos del ámbito hidrogeológico considerados de relevancia, pero no incluidos en la línea temática seleccionada por la Junta Directiva.

ALCANCE

La publicación se efectuará en formato digital anualmente en el mes de octubre bajo la Editorial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Argentino y estará disponible en la página de AIH-Grupo Argentino. El idioma oficial será el español con resúmenes en inglés.

DEL PROCESO EDITORIAL

Los artículos recibidos serán evaluados inicialmente por el Comité Editorial y remitidos a dos evaluadores bajo el sistema doble ciego. Para la publicación de los artículos se considerará particularmente la pertinencia temática, calidad, originalidad e interés general. Cabe destacar que la originalidad no sólo estará dada por el abordaje teórico, metodológico y práctico, sino también –aunque no excluyente– bajo el criterio de originalidad territorial, es decir, áreas poco estudiadas o sin antecedentes de estudios en los últimos cinco años. En

caso de haber dictámenes contradictorios entre evaluadores el artículo será enviado a un tercero.

DEL ACCESO, GRATUIDAD Y FINANCIAMIENTO

La *RAHi* es de acceso abierto y distribución gratuita. Tanto los editores, junta directiva, comité académico como autores efectúan sus contribuciones “ad honorem”.

Los gastos para la realización de la revista correrán por cuenta de la AIH-GA, para lo cual se prevé que empresas vinculadas a la hidrogeología auspicien en el cuerpo del documento y permitan solventar los gastos.

En caso de excedentes, estos quedarán en la cuenta de la AIH-GA para gastos que su Junta Directa considere convenientes.

ÍNDICE

Prólogo. Explotación intensiva y Minería de Agua Subterránea <i>Dr. Emilio Custodio Gimena</i>	<i>Pág. 7-8</i>
El agua subterránea en el abanico aluvial de La Rioja. Un recurso en crisis <i>Rubén Eduardo Ottonello y Roberto Esteban Miguel</i>	<i>Pág. 9-19</i>
Formulación de un índice de estado del acuífero para gestionar zonas con explotación intensiva <i>Eduardo E. Mariño, Lorena Ceballo, Natalia L. Loyola, Paulo Pechín, Carlos Gandi y Mariana Gagino</i>	<i>Pág. 20-30</i>
Análisis hidrogeológico del Acuífero Multiunitario Superior y su relación con la explotación intensiva de agua, Chubut. Argentina <i>Mario Grizinik y Pablo Correia</i>	<i>Pág. 31-46</i>
El recurso hídrico subterráneo y su explotación en la región de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, Argentina. <i>René Albouy, Nerea Bastianelli, Andrés Ruffo, Lucía Carrica, Juan Manuel Giorgi y Matías Rey</i>	<i>Pág. 47-58</i>
Acuíferos costeros explotados intensamente. Modelo conceptual, respuesta hidrodinámica y simulación numérica del acuífero de Mar de Plata <i>Emilia Bocanegra, Orlando Mauricio Quiroz Londoño; Sebastián Grondona; Daniel Martínez</i>	<i>Pág. 58-78</i>

PRÓLOGO

EXPLORACIÓN INTENSIVA Y MINERÍA DE AGUA SUBTERRÁNEA

*Dr. Emilio Custodio Gimena**

**emilio.custodio@upc.edu*

El agua subterránea es uno de los componentes esenciales del ciclo hidrológico. Sustenta los manantiales y el caudal de base de los ríos, y mantiene humedales y alimenta lagos. Además, puede proporcionar agua para la vida humana y sus actividades económicas y recreativas y ser un componente básico del derecho humano al agua. Lo primero se produce naturalmente y lo segundo captación.

La explotación del agua subterránea es la extracción de la misma al exterior por medios mecánicos o ejecutando obras que faciliten su aparición en superficie, como galerías o túneles. Se extrae para satisfacer actividades humanas muy diversas, entre las que la agricultura suele ser la principal, pero también para drenar permanente o temporalmente el subsuelo, lo que puede llegar a ser relativamente importante cuantitativamente. La utilización del agua de manantiales o del caudal de base de los ríos es una captación directa sin extracción.

Cualquier extracción de agua subterránea supone una determinada alteración en el funcionamiento de un acuífero o sistema acuífero, que se caracteriza por una relación causa-efecto amortiguada y retrasada, ya que normalmente el volumen de agua subterránea asociada es mucho mayor que la renovación anual debida a la recarga-descarga. Dicha alteración depende de cuánto supone, dónde se produce y en qué momento se hace la extracción. Su cualificación es relativa a los cambios hidrogeológicos, ambientales y a veces del territorio que se produzcan, desde los imperceptibles a los muy intensos. Con frecuencia se considera primariamente la cantidad de agua subterránea, pero los aspectos de salinidad y calidad son importantes y pueden llegar a ser dominantes a largo plazo.

Las alteraciones se consideran como algo negativo, pero se deben incluir los resultados positivos, aunque no es tarea fácil ya que pueden tener larga duración y en su valoración influye la tasa del interés social a aplicar a los beneficios, a los costes y daños y mermas en el patrimonio natural.

En el leguaje se ha introducido la designación sobreexplotación, pero no es recomendable utilizarla por ser coloquial, poco definida, dominada por los aspectos negativos y no cuantificable. Lo más adecuado es considerar la explotación en el contexto del balance de agua del sistema acuífero y los cambios de salinidad y calidad. En este contexto, **explotación intensiva** es aquella en que se extrae una fracción importante de la recarga o se producen cambios acusados en los niveles piezométricos y en la salinidad y calidad. Cuando a consecuencia de la exploración del agua subterránea se produce una tendencia mantenida en el descenso de niveles piezométricos o de aumento de la salinidad, se **habla de minería del agua subterránea**. Lo más frecuente es que la minería del agua subterránea esté asociada a una extracción que supera permanentemente la recarga, pero se produce también cuando la extracción no anula la descarga, como sucede en sistemas de acuíferos en montaña, por lo menos durante un largo tiempo.

La explotación intensiva del agua subterránea es algo reciente, normalmente del último medio siglo y más reciente en muchos lugares del mundo. Se explica por el gran avance en la construcción de pozos y en la maquinaria de extracción, junto con energía asequible, tecnología sencilla y aumento rápido de los conocimientos hidrogeológicos. Las situaciones

de explotación intensiva con merma o secado de manantiales, caudales de base de ríos, humedales y lagunas, gran interferencia con las aguas superficiales, intrusión marina y movilización de aguas profundas con componentes químicos nocivos son frecuentes en casi todos los países y las de minería del agua subterránea en las áreas áridas y semiáridas. Parte de la disminución de las reservas del agua en los acuíferos se ha acumulado en el mar y responde de una parte significativa del paulatino aumento del nivel del océano. Es una situación similar a la del famoso poema del aprendiz de brujo, de Goethe, magníficamente orquestada por Paul Dukas. Se requiere control para que los notables beneficios que se derivan de la explotación del agua subterránea no se pierdan por abuso y se llegue a un uso sustentable, en lo posible integrando los acuíferos con los demás recursos de agua y utilizando cada uno según sus características y en el lugar y momento apropiados.

Para buscar el uso sustentable de un acuífero o sistema acuífero se requiere buena gobernanza del agua subterránea, teniendo en cuenta la gobernanza de los recursos de agua y de los recursos naturales relacionados, como el territorio y la energía, considerando las afecciones mutuas. Con ello se busca el bien de la sociedad humana, que es el objetivo global, en un contexto participativo, de involucración y normativo apropiado y en el que la autoridad final la ejerce el gobierno. La gobernanza de las aguas subterráneas es ejercida por las fuerzas sociales y las costumbres, pero para que pueda llegar a ser efectiva debe apoyarse en un conocimiento hidrogeológico suficiente – el adecuado a la importancia de cada situación – con el apoyo en datos reales, fidedignos, compartidos y con obtención costeadada por el conjunto de usuarios de las aguas subterráneas.

Con carácter general, las actuaciones deberían ser éticas – morales aplicando principios religiosos – lo que no es lo mismo ni necesariamente coincide con que sean legales o administrativamente correctas. Por esta razón, pueden surgir conflictos en la gestión y buena gobernanza del agua subterránea, a veces complejos, y cuya solución requiere una visión amplia y atemperar las ideologías en busca de un bien superior. La búsqueda de la buena gobernanza del agua subterránea es ya urgente, pero es algo nuevo, poco experimentado y no sujeto a normas, pero que requiere que la ciencia aporte a la gestión el soporte que necesita, trabajando cada uno en su campo de competencia, aprendiendo de los éxitos y fracasos propios y de otros y buscando soluciones a medida, no por copia. Con cierta dosis de cinismo, se puede decir que no se actúa hasta que el deterioro es tangible – rara vez hay conocimiento y recursos para anticiparse – y por ello hace falta suficiente información para alarma temprana, conocimiento, transparencia y eliminación de inercias y tabús.

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ABANICO ALUVIAL DE LA RIOJA. UN RECURSO EN CRISIS

GROUNDWATER IN LA RIOJA ALLUVIAL FAN. A RESOURCE IN CRISIS

Rubén Eduardo Ottonello^{1} y Roberto Esteban Miguel²*

¹Consultor en hidrogeología. San Isidro 536, La Rioja Capital, C.P. 5300

²Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Catamarca La Rioja, Estación Experimental Agropecuaria Chilecito. Ruta de la Producción Km 7,5, Tilimuqui, Chilecito, La Rioja. C.P. 5361.

*Autor de correspondencia: rotonello@gmail.com

RESUMEN

La ciudad de La Rioja se emplaza sobre un abanico aluvial que almacena un importante volumen de agua subterránea. Actualmente, 59 pozos explotan el acuífero para uso domiciliario, a lo que se suman otros para uso agrícola e industrial. Estudios antecedentes plantean una explotación intensiva del acuífero, pero desde el año 2005 no se han realizado nuevos reportes que informen sobre su evolución. El objetivo de este trabajo fue analizar la evolución de niveles estáticos en el área urbana del abanico aluvial de La Rioja, estimar las pérdidas de reservas asociadas, así como efectuar recomendaciones para el estudio y gestión del recurso. Se efectuó la medición de niveles estáticos en ocho pozos del abanico aluvial de la ciudad de La Rioja en el año 2019 y se compararon con información antecedente. Se determinó la variación de niveles estáticos y se efectuaron numerosos cálculos asociados a las pérdidas de reservas. En adición, se calculó el balance del sistema en base a la situación actual y se recalculó teóricamente considerando ajustes en el consumo de agua potable y láminas de riego. Se evidencia la explotación intensiva y posible minería del recurso hídrico subterráneo con alteraciones hidrodinámicas y aceleraciones en las tasas de profundización que alcanzan en promedio 0,73 m/año e implican pérdidas de reservas de 5,76 hm³/año. Ajustes en los volúmenes de uso residencial e institucional y riego contribuirían a reducir el déficit actual, e incluso evitar la extracción de agua subterránea.

Palabras clave

Explotación intensiva - Minería de agua subterránea - Pérdida de reservas de agua

ABSTRACT

The city of La Rioja is located on an alluvial fan that stores a significant volume of groundwater. Currently, 59 wells pump water for residential use join others for irrigation and industrial use. Background studies suggest an intensive exploitation of the aquifer, but since 2005 there have been no new reports on its evolution. The aim of this paper was to analyze the depletion of water reserves in the urban area of the alluvial fan of La Rioja, as well as to proposing recommendations for the study and management of the resource. Static levels were measured in eight wells in the city of La Rioja in 2019 and its compared with background information. The changes of static levels ware determined and numerous calculations associated with depletion of groundwater reserves were made. In addition, the balance of the system was calculated based on the situation in 2019 and it was theoretically recalculated considering adjustments in the water of residential and irrigation use. There is evidence of the intensive exploitation and possible mining of groundwater with rates of deepening that reach an average of -0.73 m/year and imply depletion of reserves of 5.76 hm³/year.

Key words

Intensive exploitation - Groundwater mining - Groundwater depletion

INTRODUCCIÓN

La provincia de La Rioja se caracteriza por su clima árido y semiárido que se manifiesta hidrológicamente en el módulo más bajo de los recursos hídricos superficiales del país con 13 m³/seg (Cresta y Suárez, 1970). Sin embargo, cuenta con un importante volumen de reservas de agua subterránea, principalmente en el abanico aluvial de la ciudad capital de La Rioja, en el Valle Antinaco–Los Colorados y en la cuenca del Salar del Pipanaco (Sector de Bañado de los Pantanos y Aimogasta).

Área de estudio

Desde principio del Cuartario, los ríos que drenan las precipitaciones en el área de la Sierra del Velasco son los responsables del transporte y deposición de potentes espesores de sedimentos que se asientan en la zona de bajada generando los “conos aluviales”. Es el Río de la Quebrada de La Rioja el que ha construido el cono más importante de la región a expensas de su gran cuenca hidrográfica superior a los 1200 km² y donde se emplaza la ciudad capital.

El Cono Aluvial de La Rioja ocupa una superficie de ≈160 km² desde su ápice, ubicado a la salida del área montañosa (paraje de Las Padercitas). Su límite Norte lo constituye el cauce del Río de La Rodadera, y su límite Sur es el curso del Río Los Sauces-Mal Paso. Hacia el Este su área distal llega hasta una línea meridiana que de Norte a Sur conecta los parajes de La Buena Suerte, La Isabel, Pozo Largo y El Topón (Figura 1).

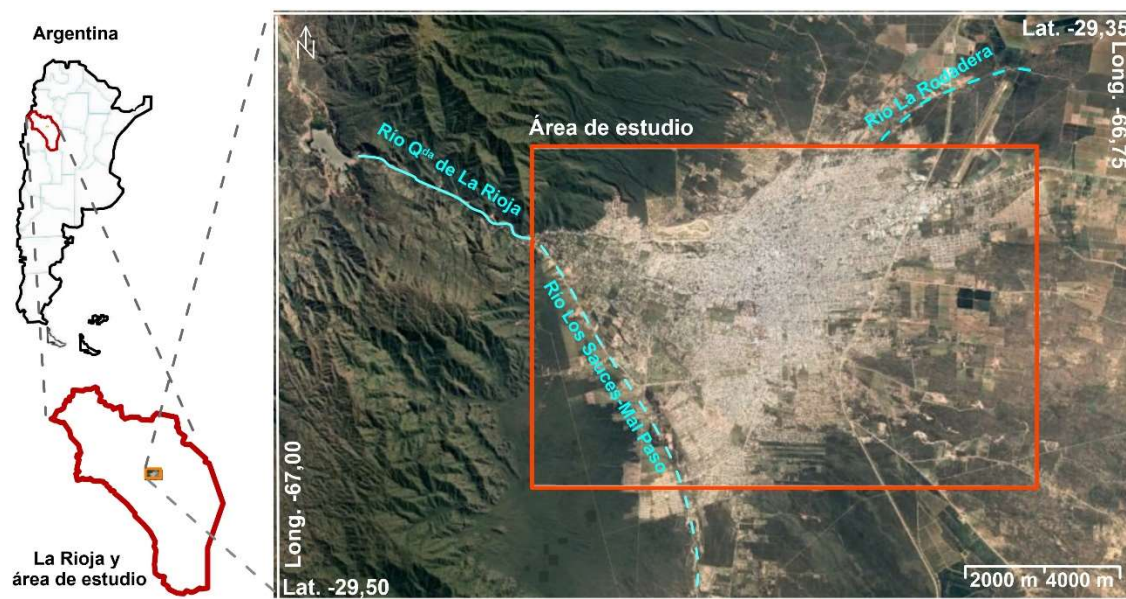


Figura 1. Posición relativa del abanico aluvial de La Rioja y área de estudio. Elaboración propia

El subsuelo del cono está representado por un potente fanglomerado con una amplia variedad granulométrica: bloques, gravillas y arenas de origen ígneo–metamórfico, con una matriz de arena y limo arcilloso, todo el conjunto muestra una pobre selección. Se estima, apoyado en registros sísmicos (Tineo, 1981), que el terreno Cuartario que aloja el agua subterránea se extendería hasta los 600 m de profundidad. La existencia de escalones tectónicos de rumbo aproximado nornordeste–Sursuroeste genera “umbrales hidráulicos” (Otonello, 1973) que afectan la circulación del agua subterránea. Entre el ápice del cono (Las Padercitas) y la falla existente al Oeste del pozo Alunai (N° 342, 29° 24' 26,73" - 66° 54' 26,13") se ubica el “umbral hidráulico N° 1” que provoca una significativa profundización del nivel del agua. La configuración de la superficie piezométrica reveló la presencia de un

segundo “umbral hidráulico N° 2” al Este causado por la presencia de una falla geológica de dirección similar a la anterior.

El ápice del cono aloja un acuífero libre con un nivel de agua a una profundidad entre 22 a 41 m. En el sector ubicado entre los “umbrales hidráulicos N°1 y N° 2” el nivel estático se mide a 217,93 m (pozo N° 342 B° Alunai) ascendiendo hasta 164,50 m (pozo N° 236 Esc. La Rioja Española). En el sector Oeste del umbral hidráulico N° 2 se ubican los pozos con niveles profundos, (NE= 216,0 m, pozo N° 226 Los Filtros N°2) con un ascenso progresivo hacia el Este (NE= 174,20 m, pozo N° 14 Plaza Sarmiento,), (NE=116,18 m, pozo N° 105 Colonia Capital). Las diferencias en los niveles estáticos de los pozos ubicados al Norte (pozos N° 215, 227, 232, 245) y al Sur (pozos N° 376, 377, 379) de la Av. Felix de La Colina (RN 75), se explican por el “umbral hidráulico 3” provocado por la “falla de la Quebrada del Río de La Rioja”. El flujo de agua subterránea presenta una dirección Oeste-Este hacia el área distal del abanico, recibiendo aportes desde el Sur hacia el centro del abanico aluvial, lo que evidencia el condicionamiento estructural provocado por las fallas, pero también influenciado por la concentración del flujo subterráneo hacia el área donde se localizan la mayoría de los pozos de abastecimiento de uso residencial y administrativo (Figura 2).

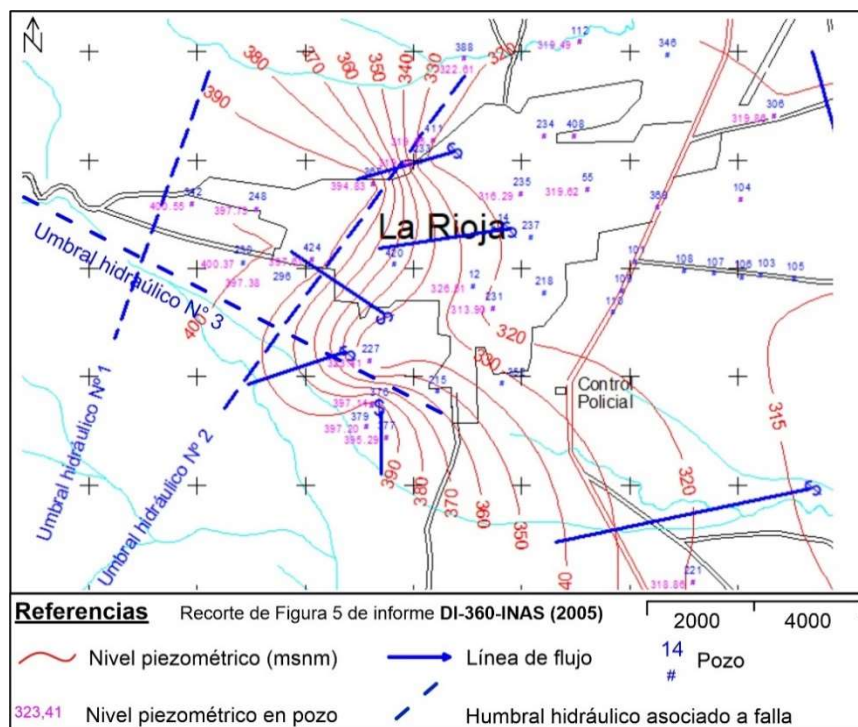


Figura 2. Curvas piezométricas y líneas de flujo en abanico aluvial de La Rioja. Se incorpora umbral hidráulico 3 asociado a falla de Quebrada de La Rioja. Tomado y modificado de Gianni *et al.*, (2005).

Los gradientes hidráulicos, al igual que los niveles estáticos, se encuentran condicionado por las fallas con valores de $\approx 0,06$ hacia el Oeste que disminuyen a $\approx 0,001$ hacia el Este (Gianni *et al.*, 2005).

El Instituto Nacional del Agua (en adelante INA) establece para la cuenca del cono aluvial un balance hidrológico referido al año 2000. Del análisis de los distintos componentes que intervienen en la ecuación del balance se obtiene que los ingresos meteóricos y superficiales al área considerada, suman 299 hm^3 , y los egresos superficiales en igual período suman 230 hm^3 , de modo que el volumen infiltrado en el área de balance es 69 hm^3 . En paralelo, se calcula que los volúmenes Infiltrados, obtenidos de la evolución del agua y

sus distintos usos, suman unos 58 hm³. La discrepancia de 11 hm³ entre los valores es considerada pequeña por el estudio. Con un criterio conservador se estimó que la recarga anual media de la cuenca subterránea del abanico aluvial de La Rioja es del orden de los 55 hm³ (Chiacchio *et al.*, 1998).

En lo que se refiere a las reservas del agua almacenada en los sedimentos Cuaternarios del subsuelo del cono aluvial, distintos informes hacen referencia a los valores que se indican en la Tabla 1. Las marcadas discrepancias en las reservas están asociadas a los disímiles criterios de espesores saturados, superficies y los valores de coeficiente de almacenamiento considerados.

Tabla 1. Valores antecedentes de reservas de agua subterránea

		D.G.E.H	I.N.A.-CRAS		Hidromediterránea
		(1974)	Libre	Confinado	(1998)
Superficie	Km ²	280	100	550	1100
Espesor	m	60	70	200	81,4
S	%	10	5	0,5	10
Reserva en un metro	hm ³ /m	28	5	0,33	110
Reserva en el espesor	hm ³ /m	1680	350	605	8954

D.G.E.H. Dirección General de Estudios Hidrogeológico; INA-CRAS, Instituto Nacional del Agua-Centro Regional de Agua Subterránea; S, coeficiente de almacenamiento.

Evolución del uso del agua subterránea

En la ciudad de La Rioja, el agua subterránea contribuye en alrededor del 60 % al suministro de agua de uso residencial e institucional (en adelante uso residencial) para la población de la ciudad capital y al 100% del riego de las fincas que circundan el ejido municipal y la totalidad de la producción de las empresas del parque industrial. Los antecedentes de perforaciones en la ciudad de La Rioja se remontan a principios del siglo XX, con la construcción (1917/19) del pozo para provisión de agua para el Hospital Presidente Plaza.

El incremento de la demanda sobre la oferta limitada de agua superficial, obligó a explorar en el subsuelo la fuente alternativa de suministro y es así que en 1972/73 se construyen cuatro pozos dentro del casco urbano ubicados en plazoleta El Triángulo, Parque Sarmiento, Hotel Provincial (actual Hotel Avant Park) y en la vieja escuela de Cochangasta, que llegaron a profundidades superiores a los 300 m, utilizados exclusivamente para satisfacer la demanda de la población. Hoy son alrededor de 47 los pozos destinados para tal fin en el abanico aluvial. Además de los pozos de agua de uso residencial se suman los destinados a riego e industria. Los caudales extraídos por los pozos de uso residencial rondan entre 50 a 145 m³/h con elevados rendimientos específicos (Gianni *et al.*, 2005) que, junto a los espesores saturados explorados, son evidencia del potencial del recurso hídrico subterráneo alojado en el cono aluvial de la Ciudad de La Rioja.

La aplicación de la Ley de Promoción Industrial (1990) y del sistema de Diferimiento Impositivo derivó en un crecimiento de la población del ≈40 % entre 1991 y 2001 junto con un importante desarrollo industrial y agrícola. La escasez del recurso hídrico superficial obligó a satisfacer el aumento de la demanda de agua potable, agrícola e industrial con agua subterránea. En el año 2017 Aguas Riojanas SAPEM destinó a la provisión del 98 % de la población un caudal promedio de 5.900 m³/h, donde el agua subterránea estuvo representada con un caudal de 3.700 m³/h y un volumen anual de 32,4 hm³ (Com. Pers. J. Sarasola). El aumento registrado, sin considerar los otros usos, se traduce en un déficit de 21 hm³/año, frente a la recarga anual media (Tabla 2).

Tabla 2. Valores antecedentes de consumos de agua, recarga y déficit

Año	Agua Potable	Riego (cultivos)	Industrias, riego forestal y de parques	Volumen total bombeado	Recarga anual media	Déficit
				hm ³ /año		
1997 (1)	17,0	24	4	45,0	55	---
2004 (2)	25,5	37,7	6	69,2		14
2017 (3)	32,4	37,7	6	76,1		21

1, Chiacchio et al., (1998); 2, Gianni et al., (2005); 3 Com. Pers. Sarasola (2017).

Antecedentes de explotación intensiva

El INA en su estudio de la cuenca del año 2005 (Gianni *et al.*, 2005) observa un descenso de los niveles piezométricos en relación a los existentes en el período 1996/98, y advierte que las importantes depresiones son “*generadas por la explotación intensa y prácticamente continua de los pozos que extraen agua para consumo de la población*”, situación que, como se advirtió en la Figura 2, conduce a la concentración de flujos hacia donde se localizan estos pozos. Custodio (2005) manifiesta que los efectos de la extracción de agua subterránea se evidencian con los “*descensos de la profundidad del nivel del agua subterránea [...] que pueden variar desde centímetros a hectómetros, son inevitables y son una consecuencia del comportamiento hidráulico; suponen una reducción del volumen de agua almacenada en el acuífero. Se tiene explotación intensiva de las aguas subterráneas cuando se produce un cambio importante del funcionamiento de los sistemas acuíferos y de sus relaciones con las otras componentes del ciclo hidrológico, principalmente las aguas superficiales y los humedales. Si la extracción es mayor que la recarga en las condiciones de esa extracción, se consumen reservas de agua continuamente, hasta su agotamiento práctico o hasta que la extracción ya no puede continuar por razones físicas, de calidad o económicas. Es lo que se denomina minería del agua subterránea*”. En adición agrega que existe una minería del agua subterránea cuando el tiempo de recuperación de los niveles de reservas, desde el inicio de la explotación, es superior a dos generaciones humanas, o sea 50 años si se detuviera el bombeo (Custodio, 2005).

En este contexto, y bajo la potencialidad de estar bajo un proceso de minería de agua subterránea en el abanico aluvial de La Rioja, preocupa a los autores que desde el año 2005 no existan nuevos informes provenientes de los organismos de Ciencia y Técnica o publicaciones por parte de las autoridades de aplicación que indiquen la situación del recurso. Por lo tanto, es objetivo de este trabajo analizar la evolución de niveles estáticos en parte del abanico aluvial de La Rioja, estimar las pérdidas de reservas asociadas, así como efectuar recomendaciones para el estudio y gestión del recurso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se efectuó la medición de niveles estáticos en ocho pozos detenidos o sin cuerpos impulsores localizados en el área de Centro Este y Sur del abanico aluvial de la ciudad de La Rioja en el mes de julio de 2019. La medición se realizó con una sonda piezométrica graduada de acero (TEOTOP 300 m) y la información se volcó en una planilla de campo. Los datos se compararon con la información disponible en la Secretaría del Agua de La Rioja, obtenida durante la construcción de los pozos, así como del informe elaborado por el INA (Gianni et al., 2005). Se procedió a la determinación de la variación de niveles estáticos y se calculó la tasa de profundización anual a partir del Programa Microsoft® Excel 2016. A modo comparativo, se calculó para cada pozo el nivel estático teórico para el año 2006 en función de la tasa de profundización previamente calculada y niveles estáticos disponibles a fin de confeccionar un mapa de variación de niveles entre el período 2006-2019 (13 años) a partir del Programa QGIS 3.22 Białowieża. Por último, a partir de la aplicación de la herramienta volumen del Programa citado se calculó la pérdida de volumen saturado en el

acuífero, así como la pérdida de reservas, al multiplicar este valor una porosidad eficaz del 10% reportada en informes antecedentes. De esta manera, se obtuvo la tasa anual de pérdidas de reservas para el área bajo estudio.

Posteriormente, y en virtud de la información antecedente, se efectuó un balance que compara la situación real de consumos de volúmenes de agua para riego y uso residencial para el año 2019, versus a un escenario de consumos de riego ajustados a laminas recomendadas y de reducción de agua extraída para uso residencial.

El estudio contó con limitaciones debido a que sólo fue posible medir en ocho pozos, existiendo un vacío de datos hacia el centro norte de la zona de estudio. Esta situación se debe a que los pozos de abastecimiento de agua potable se encuentran bajo bombeo durante 24 horas y sólo fue posible medir aquellos fuera de servicio con cañería piezométrica o abandonados sin equipo de bombeo, evitando así el riesgo de atascamiento y corte de sonda.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan los datos de mediciones de niveles estáticos en ocho pozos del abanico aluvial de la ciudad de La Rioja efectuados en Julio de 2019 en comparación con niveles antecedentes de mediciones disponibles en la Secretaría de Agua de La Rioja y del INA (Gianni *et al.*, 2005).

La interpretación de datos advierte de marcados descensos de los niveles estáticos en todos los pozos estudiados, con tasas que varían entre -0,37 m/año a -1,57 m/año con una media de -0,99 m/año.

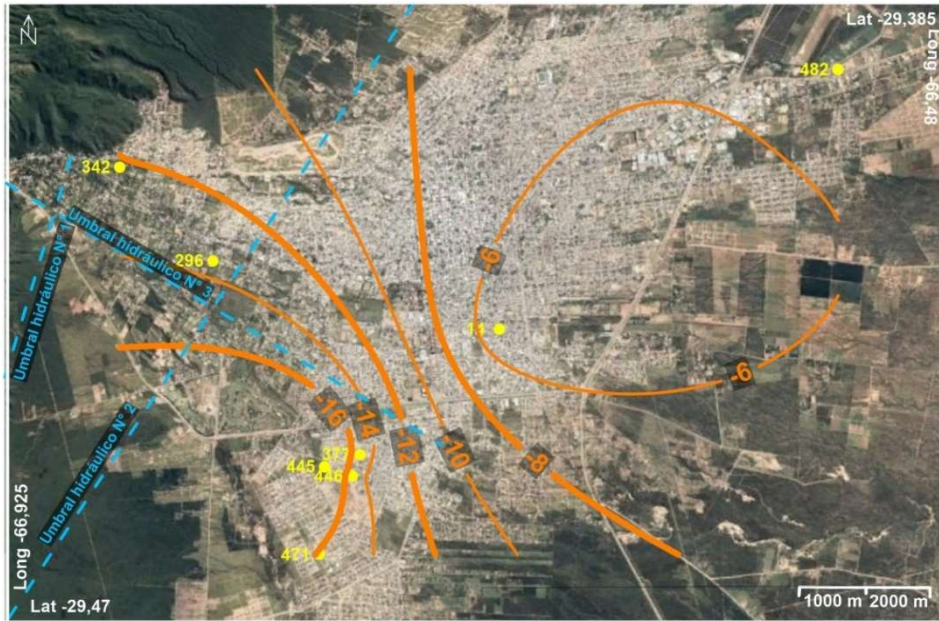
Tabla 3. Variación de niveles estáticos (disponibles) en el abanico aluvial de La Rioja con los registrados en 2019. Elaboración propia.

Pozo ^{*1}	X	Y	N.E. (mbp)	N.E. (mbp) Año 2019	Δ (m)	Δ (años)	Tasa (m/año)	N.E. (mbp) Año 2006 ^{*2}	Δ (m) 2019-2006	
342	3411931	6747187	219,5	1999	238,14	-18,64	20	-0,93	226,02	-12,12
296	3413329	6745779	186,35	2005	200,91	-14,56	14	-1,04	187,39	-13,52
14	3417622	6744753	178,7	2005	183,9	-5,2	14	-0,37	179,07	-4,83
482	3422705	6748651	120,18	2009	125,18	-5	10	-0,5	118,68	-6,5
377	3415535	6742869	131,65	2005	147,86	-16,21	14	-1,16	132,81	-15,05
445	3415003	6742687	130,7	2006	151,1	-20,4	13	-1,57	130,70	-20,40
446	3415421	6742547	131,1	2006	145,7	-14,6	13	-1,12	131,10	-14,6
471	3414924	6741368	127	2006	140,4	-13,4	11	-1,22	124,56	-15,84

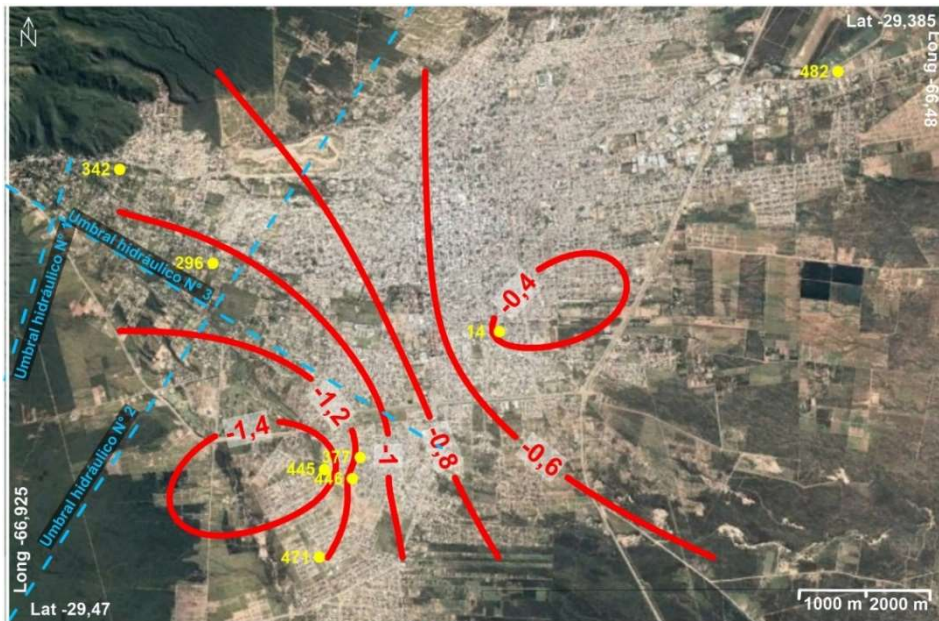
*1 Números en base a informe INA (Gianni, *et al.*, 2005) y registros de la Secretaría de Agua de La Rioja.

*2 Datos de 2006 calculados en función de tasa de descenso para cada pozo.

En la Figura 2 se presenta el mapa con los descensos calculados entre el año 2006 y 2019. Se advierte que hacia el ápice del abanico aluvial los descensos rondan los -14 m en trece años y hacia el Sur de la ciudad estos se incrementan hasta alrededor de -16 m, debido al dato del pozo 445, que es el que presenta una mayor profundización. Cabe aclarar que la ciudad de La Rioja ha experimentado en los últimos años un marcado crecimiento hacia el Sur, donde la explotación de pozos de bombeo se ha intensificado para satisfacer las demandas constantes de agua para uso residencial. Hacia el sector del centro de la ciudad y parque industrial –Este del área de estudio– los descensos no son tan marcados, y alcanzan alrededor de -6 m.



● Pozos estudiados — -10 Curvas de igual descenso de nivel estático 2006-2019 (m)
 Figura 2. Decenso de niveles en abanico aluvial de La Rioja. Elaboración propia.



● Pozos estudiados — -0,8 Curvas de igual tasa de variación de nivel estático (m/año)
 Figura 3. Tasa de descenso de niveles en abanico aluvial de La Rioja. Elaboración propia.

Un comportamiento similar se señala en el estudio de INA (Gianni *et al.*, 2005), que compara la variación de niveles entre los años 1998 y 2005 (siete años). En el área del ápice del abanico las profundizaciones son mayores (alrededor de -8 m) mientras que disminuyen hacia el área distal donde se localiza el centro y Este de la ciudad (alrededor de -2 m). En la Figura 3, se observa que las variaciones de las tasas de descenso anual se incrementan desde el Sur de la ciudad y área apical (1,4 y 1,0 m/año) hacia la zona distal del abanico aluvial de la ciudad de La Rioja (-0,4 m/año). Se evidencia un incremento de $\approx 30\%$ en las tasas de profundización si comparamos estos valores con el estudio del instituto Nacional

de Agua (2005), donde éstas alcanzaron los -1,15 y -0,28 m/año para el período 1998-2005 (Gianni *et al.*, 2005).

En la Tabla 4 se presentan los datos de pérdidas de volúmenes de espesores saturados para el área estudiada, así como la pérdida de reservas y tasa de pérdida de reserva anual. Cabe aclarar que, como se planteó en las limitaciones del estudio, estos cálculos se efectúan para un área acotada de explotación y que las pérdidas de reserva abarcan un área sustancialmente mayor pero que, por las limitaciones mencionadas, no se abordaron en este estudio.

Tabla 4. Pérdidas de volúmenes saturados y reservas de agua subterránea. Elaboración propia.

Área de estudio Km ²	Tasa de descenso (8 pozos) m/año	Tasa de descenso (ponderada por área) m/año	Pérdida de volumen saturado hm ³	Pérdida de reservas hm ³	Tasa de Pérdida de reservas hm ³ /año
78,5	0,99	0,73	749,3	74,9	5,76

Si se considera la tasa de descenso anual promediando los 8 pozos en estudio, ésta es de -0,99 m. Sin embargo, al considerar el área de explotación estudiada (78,5 km²) y la pérdida de volumen saturado de 749,3 hm³ en 13 años, la tasa de descenso “ponderada por el área” es de 0,73 m/año. Además, la pérdida de reservas en 13 años, considerando un coeficiente de almacenamiento del 10 %, es de 74,9 hm³ lo que equivale a una tasa de pérdida de reservas de 5,76 hm³/año. Este volumen de reservas equivale al requerimiento de agua potable de una población de 71.000 habitantes en un año, 35 % de la actual población de la ciudad Capital, considerando el consumo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 100 L/hab/día.

Si se considera que el volumen total de agua (superficial y subterránea) destinado para uso residencial en el año 2017 fue de 51.684.000 m³ (32.400.000 m³ corresponden a agua subterráneas y 19.284.000 m³ a agua superficial) y que la población de La Rioja Capital rondaría los 197.500 habitantes (calculado sobre la base de un incremento intercensal del 24,5 % en 9 años en base a INDEC, 2010) se estima un gasto de 717 litros habitante por día, 700% por encima de los valores recomendados por la OMS, de no considerar las pérdidas en el sistema de distribución.

La demanda de riego es otro ítem de gran relevancia a abordar. No es aceptable que, con las actuales tecnologías de riego por goteo y programaciones de riego deficitario, las láminas de olivo y vid alcancen en La Rioja Capital valores de 9.000 y 10.000 m³/ha/año respectivamente (Gianni *et al.*, 2005). Estos volúmenes, de hacerse de manera ajustada, deberían rondar los 7600 a 7650 m³/ha/año para vid y olivo (Costa y Minetti, 2001), es decir un 15,5 y 25,5 % inferior a lo expresado en el informe de INA en base a aportes de responsables de producción de la Fincas.

En la Tabla 5 se presenta el balance calculado para el año 2019, con una proyección de población de 223.000 habitantes bajo el consumo calculado para el año 2017. Se presenta un “supuesto 1”, que contempla la reducción de la dotación en un 50 % (360 L/hab/día) y un “supuesto 2” con un consumo de 100 L/hab/día, pero considerando un 40 % de pérdidas de la red lo que conlleva a una dotación de 140 L/hab/día. En el caso del riego, se considera para ambos supuestos una mejora en la aplicación del riego del 20,4 % sin cambios en la superficie irrigada. Para todos los casos, el consumo industrial y de riego de parques permanece en 6 hm³/año. Los supuestos no consideran retornos de pérdidas de la red, así como pérdidas de sistema de alcantarillado o retornos de riego.

Se evidencia que, si se aborda la gestión de la demanda y se reduce la dotación total a 360 L/hab/día el balance del acuífero bajo los supuestos establecidos indican que no

existiría déficit. En el caso de extremar la reducción de la dotación a 100 L/hab/día con una pérdida del sistema de 40 % (140 L/hab/día) no sería necesario, en términos teóricos, la explotación del acuífero del cono aluvial de La Rioja para agua potable. Cabe aclarar que, en términos prácticos, y más allá de la reducción de la dotación, se requerirá de la explotación del acuífero en períodos estivales debido a la configuración del actual diseño de la red.

Tabla 5. Balance de agua para año 2019 y balance teórico en base a ajustes en la demanda

Año	Agua de red de origen subterránea	Riego (cultivos)	Industrias, riego forestal y de parques	Volumen total bombeado	Recarga anual media	Déficit
hm ³ /año						
2019 ⁽¹⁾	39,1	37,7	6	82,8		- 27,8
Supuesto 1	10,2	32,7	6	52,7	55	+ 6,1
Supuesto 2	0	32,3	6	38,3		+ 16,7

⁽¹⁾ Ver Tabla 2 en este documento. La proyección para el año 2019 se recalculó con datos del año 2017 en base al incremento poblacional.

Como plantea Custodio (2005) la explotación intensiva o minería del agua subterránea presenta otras consecuencias más allá de la propia pérdida de reservas de agua subterránea. En el caso particular del abanico aluvial de La Rioja es evidente que una profundización de los niveles estáticos lleva a mayores niveles dinámicos y a la obtención de menores caudales en virtud de las curvas H/Q (altura/caudal) de cada bomba. Si la demanda se mantiene constante o se incrementa, los niveles estáticos continuaran profundizándose y sólo será posible satisfacerla aumentando las horas de bombeo o con la construcción de nuevos pozos. Esto se traduce en consumos incrementales de energía eléctrica, costo de funcionamiento y mantenimiento, así como la necesidad de construcción de nueva infraestructura que aumentará también los costos en los servicios e impactará en la economía local.

CONCLUSIONES

Se ha establecido en el abanico aluvial de La Rioja un escenario crítico a partir de la “explotación intensiva del recurso hídrico subterráneo” que se advierte en un marcado cambio en la hidrodinámica del acuífero, con concentraciones de líneas de flujo y pérdidas de reservas. No es posible aún plantear una situación de minería de agua subterránea ya que la información disponible no permite desarrollar una modelación matemática que indique, en un escenario de no bombeo y recuperación plena, que los niveles de agua subterránea demorarían más de 50 años en alcanzar los niveles de reservas iniciales. De continuar o incrementarse la explotación se acelerarán las profundizaciones, los costos de extracción vinculados a la energía, mantenimiento y construcción de nueva infraestructura.

Se ha evidenciado la necesidad de abordar la gestión de la demanda de agua en función de elevados consumos (L/hab/día) que superan en un 700 % lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud. De manera similar, es oportuno reducir en alrededor de un 20% los consumos de agua para riego sin detrimento de la producción al ajustar las láminas aplicadas. De esta manera será posible reducir e incluso evitar el déficit actual en el balance entre la recarga y la extracción del agua subterránea.

Por otro lado, cabe destacar que es fundamental abordar la cuestión de la calidad química del recurso en futuros trabajos, ya que, si bien no se han presentado los datos, hay

evidencias de salinización y procesos de contaminación antrópica con elevados tenores de Nitrato. Por otro lado, es necesario ampliar el área de estudio a toda la superficie del abanico aluvial.

Finalmente, se recomienda al menos el monitoreo de la evolución del sistema acuífero con la toma de niveles estáticos, dinámicos, caudales erogados instantáneos y totales, así como calidad de agua al menos cada seis meses en los pozos que abastecen la red de agua potable. Estos datos, deberían ser sistematizados y publicados a fin de sensibilizar a las autoridades de aplicación, tomadores de decisión y población en general sobre la situación crítica del agua subterránea, recurso que sustenta la vida en la ciudad. Adicionalmente, se propone la construcción de una red de monitoreo en pozos desactivados con equipos de registro automático de niveles cada seis horas de manera de conocer el comportamiento diario a lo largo del tiempo y advertir procesos de abatimientos, episodios de recarga, entre otros.

Dejar de atender el delicado escenario hídrico, puede originar en el futuro situaciones no deseadas, tales como disponer una disminución de la dotación de litros habitante día por debajo de lo recomendable, sectorizar la entrega de agua a los barrios, o llegar, en el caso más extremo, a un escenario minería de agua subterránea consumado donde por razones físicas, de calidad o económicas no sea posible extraer o utilizar el recurso.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. José Luís Sarasola de Aguas Riojanas SAPEM por sus valiosas comunicaciones personales que resultaron de gran utilidad para la elaboración de este documento.

BIBLIOGRAFÍA

- Cresta, M.I. y Suarez, M.T. (1970).** Recursos Hídricos. En: Manual de Historia y Geografía de La Rioja Compilador Lafón, H.R. Compañía Editora Riojana, La Rioja, Argentina. 199-399.
- Chiacchio J., Guimaraes R., Salvioli, G., Sánchez V. (1998).** Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca Subterránea de La Rioja Capital. INA-CRAS. Documento Interno DI-290. San Juan.
- Costa, M.C. y Minetti, J.L. (2001).** El agua: una limitante de la agricultura en La Rioja. Jornada de Avances en la Producción Vegetal del NOA. San Miguel de Tucumán. 146-152.
- Custodio Gimena, E. (2015).** Explotación intensiva y minera de las aguas subterráneas: situación general y particular de España: ¿una bendición o una calamidad? Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 108, (1-2), 13-20.
- Hidromediterránea S.R.L. (1998).** Evaluación Hidrogeológica del Recurso Hídrico Superficial y Subterráneo del Cono Aluvial de la Ciudad de La Rioja y Áreas de Promoción Agrícola en el Dpto. Capital. La Rioja.
- INDEC (2010).** Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, procesado con Redatam+SP. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Disponible en <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel3-Tema-2-41> [Ultimo acceso 11.2.2022].
- Gianni, R., Luna, P., Poblete, M., Salvioli, G. (2005).** Diagnóstico expeditivo del estado actual de la piezometría y extracción de agua subterránea en el cono aluvial del río de La Rioja. INA-CRAS. Documento Interno DI-360. San Juan 2005. 26.
- Otonello, R. (1973).** Recursos Hídricos Subterráneos. En: Evaluación hidrogeológica de la cuenca y cono aluvial del río de La Rioja y faldeo oriental del Velasco. Capítulo 3. Dirección de Estudios Hidrológicos. La Rioja. 20.

Tineo, A. (1981). Lineamientos geológicos de la cuenca oriental de La Rioja entre las Sierras de Velasco y las Sierras Brava. Acta Geológica Lilloana. Fundación Lillo. Tucumán. Volumen 15, (3), 40-48.

Trabajo recibido el 30/03/2022 y aprobado para su publicación el 05/04/2022.

Cómo citar este artículo

Ottonello, R.E. y Miguel, R.E. (2022). El agua subterránea en el abanico aluvial de La Rioja. Un recurso en crisis. *Revista Argentina de Hidrogeología*, 1:9-13

FORMULACIÓN DE UN ÍNDICE DE ESTADO DEL ACUÍFERO PARA GESTIONAR ZONAS CON EXPLOTACIÓN INTENSIVA

AN INDEX OF THE STATE OF AQUIFER FOR MANAGEMENT OF GROUNDWATER UNDER INTENSIVE EXPLOITATION

Eduardo E. Mariño¹, Lorena Ceballo¹, Natalia L. Loyola¹,
Paulo Pechín², Carlos Gandí³ y Mariana Gagino²*

¹Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Ruta Nac. N° 35, Km 334, 6300, Santa Rosa, La Pampa, Argentina

²CORPICO- Servicio de Agua Potable y Saneamiento Ambiental, Calle 13 e/ 104 y 106, 6360, General Pico, La Pampa, Argentina

³Administración Provincial del Agua, Olascoaga 540, 6300, Santa Rosa, La Pampa, Argentina

*Autor de correspondencia: emarinio@exactas.unlpam.edu.ar

RESUMEN

En este artículo se formula un índice de estado del acuífero (IEA) basado en la integración de dos indicadores referidos al descenso del nivel freático y al deterioro de la calidad, medido a través de uno o más parámetros hidroquímicos. Se trata de diseñar una herramienta de fácil aplicación que, con un requerimiento de datos acorde a áreas con escasa información, contribuya a la toma de decisiones de corto y mediano plazo en la gestión hídrica, especialmente en zonas sometidas a explotación intensiva. Dentro del marco teórico de la lógica difusa, el IEA valora el estado del sistema por asignación de un puntaje y una categoría, de manera que resulta simple tanto la interpretación de sus resultados como el seguimiento de su evolución temporal. El sistema presenta flexibilidad para, de acuerdo al conocimiento previo del sistema acuífero a evaluar, seleccionar los puntos de control y los parámetros cualitativos que resulten más representativos. Con fines ilustrativos, se presenta un caso de aplicación a un área en el NE de la provincia de La Pampa, donde se evalúa el período de referencia 2009-2019. Se concluye que, por el momento, la explotación intensiva no ha tenido un impacto severo sobre el estado del acuífero, situación que puede atribuirse a una gestión correcta de la demanda. Sin embargo, para lograr el mejoramiento del estado del sistema, y la sustentabilidad del recurso, será necesaria una reducción de los volúmenes extraídos, a partir de la disponibilidad de fuentes de abastecimiento complementarias.

Palabras Clave:

Gestión de los recursos hídricos - Agua subterránea - Indicadores ambientales - Lógica matemática

ABSTRACT

This paper develops a groundwater state index (GWSI) based in the integration of two indicators referred to the water-table depletion and the quality deterioration, measured by one or more chemical parameters. The aim is to design an easy tool that contribute to groundwater management, especially in zones with intensive exploitation, and adequate to areas with scarce information. GWSI is a fuzzy-based index which assesses the quantitative and qualitative state of groundwater by assigning a score and a category, so that both the interpretation of its results and the monitoring of its temporal evolution are simple. An application case was presented for an area of the NE of La Pampa province, where the reference period 2009-2019 was evaluated. It is concluded that intensive aquifer exploitation has not had a severe impact on the groundwater state so far, a situation that can be attributed to correct water demand management. However, in order to improve the state of the system

and to maintain a sustainable use of groundwater resources, it will be necessary a reduction in the whole aquifer abstraction, based on the availability of complementary supply sources.

Key words:

Water resources management - Groundwater - Environmental indicators - Mathematical logic

INTRODUCCIÓN

En regiones áridas y semiáridas carentes de ríos o arroyos y donde los cuerpos superficiales presentan elevada salinidad, las aguas subterráneas constituyen el principal recurso hídrico para atender la demanda para diversos usos, como el abastecimiento urbano, la bebida del ganado, la irrigación de cultivos y pasturas y la producción industrial.

La ocurrencia de dichas fuentes está ligada a ciertas características geológicas y geomorfológicas que favorecen la infiltración del agua de lluvia, dando lugar a condiciones localmente preferenciales para la recarga de los acuíferos y consecuentemente a una mejora relativa de la calidad del agua subterránea.

Por su expresión espacial generalmente reducida, estas áreas acuíferas son frágiles y susceptibles de sufrir un deterioro cuantitativo y cualitativo cuando se las somete a un aprovechamiento intensivo, es decir cuando se extrae una proporción significativa de la recarga interanual (Custodio *et al.*, 2005) y se produce un cambio en el funcionamiento de los sistemas acuíferos (Custodio Gimena, 2015).

En ese contexto, la planificación adquiere una especial relevancia para la formulación de planes que compatibilicen las necesidades regionales con una gestión sustentable de los recursos hídricos. La sustentabilidad debe entenderse como un concepto multidimensional que contemple, al menos, aspectos ambientales, sociales, económicos, legales e institucionales (Llamas *et al.*, 2006; Pandey *et al.*, 2011; Bockstaller *et al.*, 2017; Chanapathi *et al.*, 2019).

Con tal aproximación holística, la identificación y el desarrollo de indicadores de sustentabilidad de recursos hídricos subterráneos tiene como referencia el trabajo llevado a cabo por un grupo de expertos convocados por UNESCO (Vrba y Lipponen, 2007). Sin embargo, la aplicación del conjunto de indicadores propuestos requiere disponer de estimaciones cuantitativas que no siempre están disponibles en regiones con escasa información y débil organización institucional, donde el análisis queda restringido a aquellos factores que cuenten con los datos necesarios. También se debe considerar la escala de análisis, ya que a veces se apunta a evaluaciones a nivel nacional o global (Lavapuro *et al.*, 2008; Gleeson *et al.*, 2012; Gain *et al.*, 2016; Alley *et al.*, 2017; Gleeson *et al.*, 2020) y en otros casos interesan las determinaciones de mayor detalle sobre el estado de los recursos hídricos subterráneos en un área en particular.

Como método para la formulación de índices, la lógica difusa (Zadeh, 1965) posee, con respecto a la lógica clásica, una flexibilidad mayor para afrontar la ambigüedad e incertidumbre inherentes a los sistemas naturales. Asimismo, permite formulaciones lingüísticas que resultan más comprensibles y útiles para usuarios y gestores (Zadeh, 2008; Jinturkar *et al.*, 2010; Caniani *et al.*, 2015; Vadiati *et al.*, 2016; Chanapathi *et al.*, 2019; Jha *et al.*, 2020).

Los índices basados en sistemas de inferencia difusa se han aplicado en numerosos trabajos referidos a gestión sustentable del agua subterránea (Bagheri *et al.*, 2006; Yin *et al.*, 2012; Fleming *et al.*, 2014; Chanapathi *et al.*, 2019), caracterización hidroquímica y calidad del agua del agua subterránea (Singh *et al.*, 2008; Şen, 2009; Dahiya *et al.*, 2007; Jinturkar *et al.*, 2010; Kamrani *et al.*, 2016; Vadiati *et al.*, 2016; Jamshidzadeh y Tavangari

Barzi, 2018; Jha *et al.*, 2020) y vulnerabilidad, contaminación y remediación de acuíferos (Dixon, 2005; Gemitzi *et al.*, 2006; Afshar *et al.*, 2007; Nasiri *et al.*, 2007; Nobre *et al.*, 2007; Mohammadi *et al.*, 2009; Pathak y Hiratsuka, 2011; Massone *et al.*, 2013; Caniani *et al.*, 2015; Nadiri *et al.*, 2017; Duhalde *et al.*, 2018).

Dentro de dicho marco teórico, este trabajo pretende suministrar una herramienta de fácil aplicación, con un requerimiento de datos acorde a áreas con escasa información y una interpretación sencilla para gestores, técnicos y usuarios de servicios de abastecimiento urbano, que facilite la toma de decisiones de corto y mediano plazo. Finalmente, con fines ilustrativos, se presenta un caso de aplicación a un área explotada intensivamente en el NE de la provincia de La Pampa.

METODOLOGÍA

El índice de estado del acuífero (IEA) se basa en la integración de dos indicadores simples referidos al descenso del nivel freático y al deterioro de la calidad, medido a través de uno o más parámetros hidroquímicos.

Indicador de descenso del nivel freático

La dimensión del indicador de descenso del nivel freático (IDNF) es la preservación de las reservas y adopta como variable a la profundidad del nivel freático, medida en un punto de control al final del intervalo de evaluación considerado. Su valor varía entre 0 y 1, indicando respectivamente que el nivel freático se encuentra en la posición más somera (sin disminución de almacenamiento) o más profunda (disminución máxima del almacenamiento) del período de referencia. El IDNF se obtiene mediante la Ecuación 1:

$$IDNF_t = \frac{NF_t - NF_{mínT}}{NF_{máxT} - NF_{mínT}} \quad (1)$$

dónde: NF_t es la profundidad del nivel freático al final del intervalo de evaluación (t) y $NF_{mín}$ y $NF_{máx}$ son, respectivamente, la menor y mayor profundidad del nivel freático en el período de referencia (T).

Indicador de deterioro de la calidad del agua

La dimensión del indicador de deterioro de la calidad del agua (IDC) toma en cuenta la preservación cualitativa del agua subterránea y utiliza como variable la concentración (o el valor) de uno o más parámetros físicos y/o químicos, determinados en un punto de muestreo al final del intervalo de evaluación considerado. Toma valores entre 0 y 1, indicando respectivamente que las variables hidroquímicas se encuentran con la concentración mínima (sin afectación cualitativa) o máxima (afectación cualitativa extrema) del período de referencia. El indicador de deterioro (ID_i) para cada uno de los parámetros seleccionados, se obtiene mediante la Ecuación 2:

$$ID_{it} = \frac{C_{it} - C_{míniT}}{C_{máxiT} - C_{míniT}} \quad (2)$$

dónde: C_{it} es la concentración (o el valor) del parámetro i al final del intervalo de evaluación (t) y, $C_{mín}$ y $C_{máx}$ son, respectivamente, la menor y mayor concentración (o valor) del parámetro i en el período de referencia (T).

A su vez, el IDC (Ecuación 3) resultará del promedio de los ID de los n parámetros considerados, los cuales se podrán multiplicar por un coeficiente de peso (w_i) asignado en función de su importancia relativa:

$$IDC_t = \frac{\sum (w_i \cdot ID_{it})}{n} \quad (3)$$

Índice de estado del acuífero

Los dos indicadores clásicos descriptos anteriormente se integraron para obtener un índice de estado del acuífero (IEA), que puede adoptar un valor entre 0 y 10. Para ello se aplicó un sistema de inferencia difusa (SID), para cuyo diseño y resolución se dispone de varias herramientas informáticas, algunas de las cuales son de acceso libre, como la que se utilizó en este trabajo (Baturone *et al.*, 2007).

La lógica difusa establece que un elemento x tiene un grado de pertenencia $\mu_A(x)$, entre 0 y 1, a un conjunto difuso A en un universo de discurso U , donde A está caracterizado por una función de pertenencia $f_A(x)$. Entonces, el primer paso consistió en definir el universo de discurso, los conjuntos difusos y funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida del SID. Entre las diferentes formas que pueden tener las funciones de pertenencia, se utilizaron las de tipo triangular (Ecuación 4) y trapezoidal (Ecuación 5), que son reconocidas por su simplicidad y frecuentemente empleadas en aplicaciones de la lógica difusa a problemas ambientales.

$$f(x; a, b, c) = f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (4)$$

$$f(x; a, b, c, d) = f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (5)$$

El siguiente paso requiere establecer las reglas que relacionan los conjuntos difusos de las variables de entrada (antecedentes) con los conjuntos de la variable de salida (consecuente) y deben tender a cumplir dos objetivos (Fleming *et al.*, 2014): a) que los valores del índice resultante guarden cierta proporcionalidad con los indicadores de entrada y b) que los indicadores de entrada no se enmascaren recíprocamente, es decir que el índice resultante refleje con sensibilidad una condición desfavorable de cualquiera de ellos. Las reglas difusas se expresan como formulaciones lógicas condicionales del tipo “SI-ENTONCES” y, en este caso, los antecedentes están conectados por el operador “Y”. Este operador mínimo está definido por la Ecuación 6, donde A y B son conjuntos difusos y x es un elemento que pertenece simultáneamente a ambos.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6)$$

Dado que el resultado del SID es también un conjunto difuso, es necesario aplicar algún procedimiento para convertirlo en un valor numérico, que pueda ser fácilmente comunicado y comprendido. En este caso se utilizó el método del centroide, también llamado centro de área o centro de gravedad, que es el más ampliamente aplicado y cuya eficiencia con respecto a otros métodos ha sido probada (Naaz *et al.*, 2011; Ross, 2012; Caniani *et al.*, 2015; Chanapathi *et al.*, 2019). Siendo C el conjunto difuso resultante de la unión de dos o más funciones de pertenencia de la variable de salida $\mu_C(z)$, según la cantidad de reglas activadas, el método del centroide produce un valor de salida z_{out} mediante la ecuación 7.

$$z_{out} = \frac{\sum_i z_i \mu_c(z_i)}{\sum_i \mu_c(z_i)} \quad (7)$$

Caso de aplicación

Para la aplicación de la metodología propuesta se seleccionó un área ubicada en el NE de la provincia de La Pampa, que se explota para el abastecimiento a la localidad de General Pico (Figura 1).

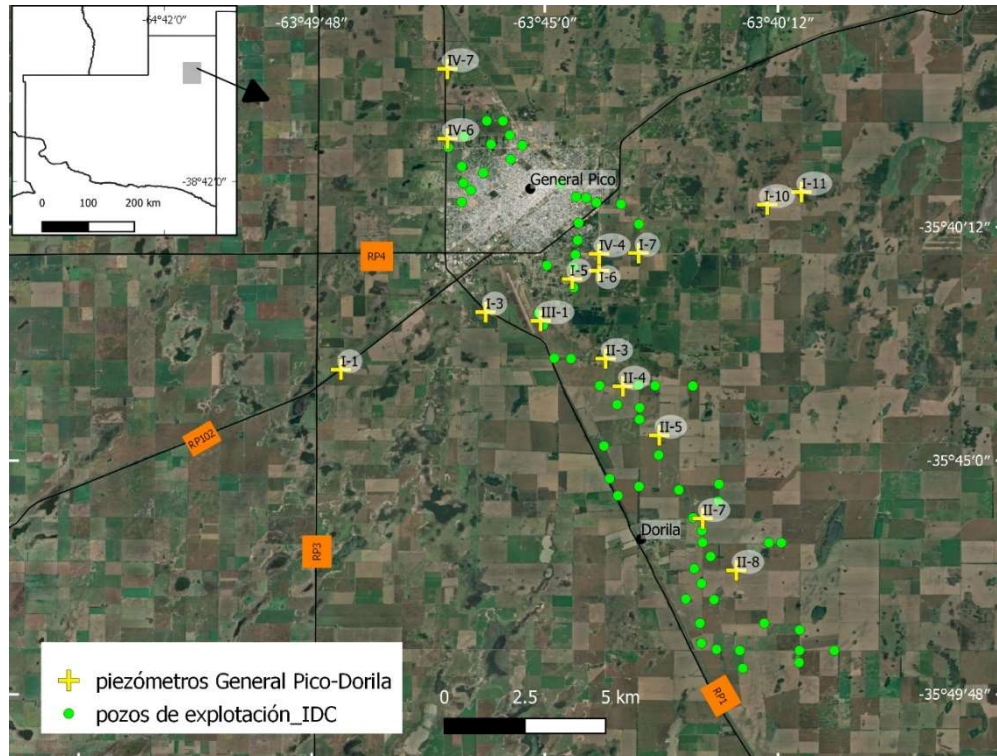


Figura 1. Mapa del área seleccionada como caso de aplicación, con la ubicación de puntos de control.

El agua subterránea se obtiene de un acuífero en ambiente medanoso, de baja productividad (acuítardo) y con restricciones de calidad para consumo humano por concentraciones elevadas de fluoruro y arsénico (Smedley *et al.*, 2000; Schulz *et al.*, 2001; UNLPam, 2015; Aullón Alcaine *et al.*, 2020; Mariño *et al.*, 2020). La batería de pozos de explotación está ubicada al sur de la ciudad y consta de 112 pozos distribuidos en un área de unos 100 km². El servicio de provisión, que atiende actualmente unos 27.000 usuarios residenciales e industriales, comenzó a operar en 1986 con 32 perforaciones, que se han incrementado gradualmente, tanto para atender el aumento de la demanda como para reemplazar aquellos pozos que sufrieron deterioros severos en la calidad del agua extraída. Esto se debe a que la intensificación del régimen de bombeo tiene un correlato hidroquímico que determina un aumento en las concentraciones de arsénico y fluoruro (Medus *et al.*, 2005).

Para el cálculo del IEA se tomó el período de referencia 2009-2019, con intervalos de evaluación aproximadamente anuales. Las fluctuaciones del nivel freático requeridas para calcular el IDNF se obtuvieron de mediciones de la profundidad del NF en un número de piezómetros variable entre 5 y 13 (Figura 1). Por su parte, el IDC se basó en las concentraciones de fluoruro y arsénico en muestras provenientes de entre 42 y 58 pozos de

explotación (Figura 1). Para caracterizar al sistema se promediaron los indicadores obtenidos en los puntos de control disponibles para cada intervalo de evaluación.

Las etiquetas lingüísticas (categorías) dadas a cada conjunto difuso y sus valores límites para el caso de aplicación, se muestran en la Figura 2 y se basan en la interpretación conceptual de cada indicador, de acuerdo con el conocimiento previo del comportamiento sistema acuífero.

Se considera que si el IDNF es menor o igual a 0,2, corresponde a descensos del nivel freático provocado por las variaciones naturales del sistema, con una influencia despreciable de la explotación y que se podrían revertir en períodos subsiguientes con mejores condiciones climáticas para la recarga. En cambio, un IDNF mayor a 0,7 indicaría un impacto severo o muy severo sobre el almacenamiento del sistema.

Con respecto al IDC, se interpreta que cuando es menor o igual a 0,1 refleja incertidumbres analíticas, errores de muestreo u otras causas no atribuibles a un deterioro en la calidad del agua subterránea por efecto de la explotación intensiva. Por el contrario un IDC mayor a 0,6 indica una degradación cualitativa severa a muy severa del sistema y de carácter casi permanente. Esto significa que resultaría difícil de revertir a través de ciclos de recuperación por detención temporaria del bombeo del pozo y conduciría al futuro abandono del mismo.

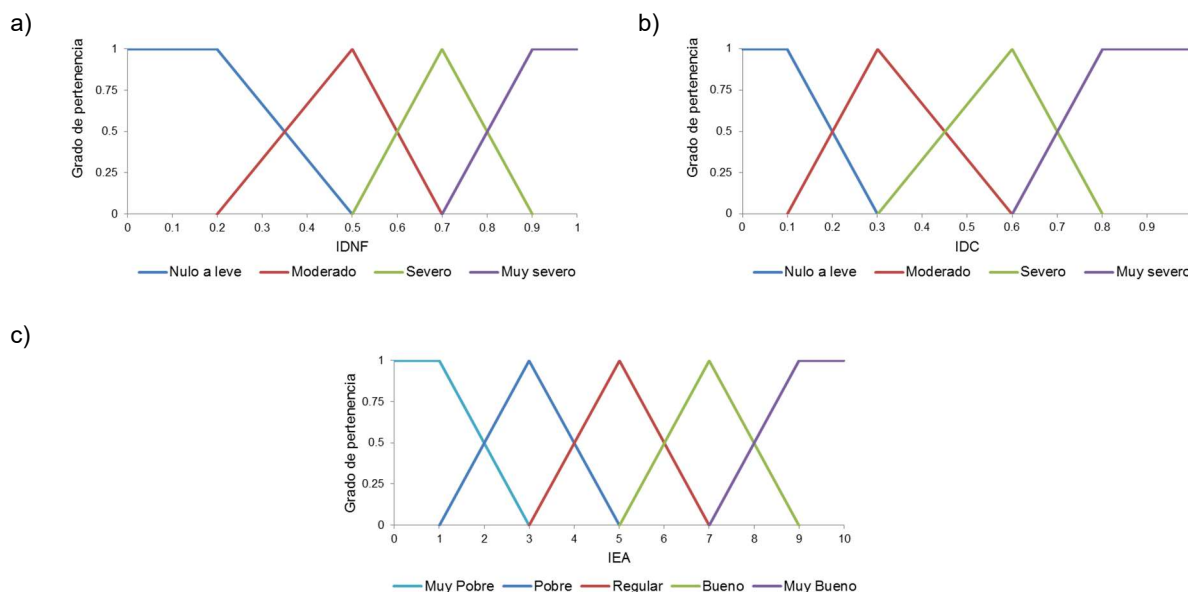


Figura 2. Conjuntos difusos y funciones de pertenencia para: a) el índice de descenso del nivel freático (IDNF), b) el índice de deterioro de la calidad (IDC) y c) el índice de estado del acuífero (IEA).

A su vez, un IEA menor a 3 indica que el estado del acuífero es pobre a muy pobre, lo que condicionará seriamente la capacidad de sostener la provisión de agua potable en condiciones adecuadas y exigirá un replanteo del plan de manejo vigente. En cambio, un IEA de 7 o más mostrará que la condición del acuífero es buena a muy buena, lo que implica que el sistema de abastecimiento puede satisfacer la demanda actual sin provocar deterioros cuantitativos y/o cualitativos en el agua subterránea. Las calificaciones intermedias corresponderán a una situación moderada que, para no agravarse, requerirá introducir ajustes en la gestión del recurso.

Las reglas difusas que determinan el IEA a partir de los indicadores de entrada se detallan en la Tabla 1. El criterio seguido para su definición considera que el estado del

acuífero empeora con el incremento de ambos valores de entrada, aunque asigna al indicador cualitativo (IDC) una sensibilidad algo mayor en la determinación del estado resultante. Dado que el SID fue construido de manera tal que sólo se superponen los conjuntos difusos adyacentes (Figura 2), cada una de las variables de entrada tendrá un grado de pertenencia parcial a no más de 2 categorías y en consecuencia activarán un máximo de 4 reglas.

Tabla 1. Sistema de reglas difusas.

R1	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Muy bueno
R2	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Bueno
R3	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Regular
R4	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Pobre
R5	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Bueno
R6	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Bueno
R7	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Regular
R8	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Pobre
R9	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Regular
R10	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Regular
R11	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Pobre
R12	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Pobre
R13	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Pobre
R14	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Pobre
R15	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Pobre
R16	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Muy pobre

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos (Tabla 2) indican que el estado del sistema es “regular” para todo el período de análisis, con un puntaje medio de 5,05, aunque se evidencia una mejora respecto a la condición inicial, debida a la tendencia ascendente del nivel freático, que se traduce en una disminución del IDNF.

Cabe considerar que esta situación se corresponde con un período de registros pluviométricos elevados (con una media anual de 906,5 mm), en el cual sólo el intervalo 2017/18 puede considerarse condicionado por la precipitación, según el criterio de Mariño y Dalmaso (2003) quienes concluyeron que en años pluviométricos con registros inferiores a 600 mm, la extracción superaría ampliamente a la recarga, provocando profundizaciones significativas del nivel freático.

Tabla 2. Estado del sistema acuífero en cada intervalo de evaluación.

Intervalo	IDNF	IDC	IEA	Estado
2009/10	0,88	0,35	3,27	Regular
2010/11	0,89	0,53	3,15	Regular
2011/12	0,55	0,51	5,08	Regular
2012/13	0,40	0,38	6,37	Regular
2013/14	0,56	0,52	4,95	Regular
2014/15	0,70	0,46	3,95	Regular
2015/16	0,38	0,43	6,11	Regular
2016/17	0,19	0,44	6,05	Regular
2017/18	0,34	0,50	5,8	Regular
2018/19	0,40	0,50	5,73	Regular

En el período de referencia, la demanda, estimada a partir de datos de macromedición en el sistema de distribución, puede considerarse estable (con un rango entre 3,9 y 4,9 hm³/año). Sin embargo, su valor medio (4,5 hm³) determina un régimen de explotación intensiva, ya

que compromete una parte significativa de la recarga, si se tienen en cuenta los cálculos más recientes que estiman un promedio anual de unos 100 mm (Massara *et al.*, 2015), que representan unas reservas reguladoras anuales de 5 hm³.

Dada su formulación basada en la lógica difusa, el IEA constituye un método de evaluación robusto frente a las incertidumbres inherentes a los sistemas hídricos, especialmente en áreas con insuficiente información. Por otra parte, la interpretación de sus resultados y el seguimiento de su evolución temporal son simples, ya que el estado del sistema se valora por asignación de un puntaje y una categoría.

Finalmente, el IEA resulta de fácil aplicación, ya que para su cálculo se dispone de varios recursos informáticos de acceso libre y su diseño le otorga flexibilidad para modificar las variables de entrada, los límites de los respectivos conjuntos difusos y el sistema de reglas. Así, resulta factible su aplicación en distintas áreas bajo explotación intensiva, donde el conocimiento previo del sistema acuífero a evaluar permitirá seleccionar los parámetros cualitativos que resulten más representativos y/o sensibles en cada caso, como lo fueron fluoruro y arsénico en el caso presentado.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un índice que, con un requerimiento de datos acorde a áreas con información limitada, permite evaluar el estado de un acuífero y contribuye en la gestión de recursos hídricos subterráneos sometidos a explotación intensiva.

Con respecto al caso de aplicación presentado, se puede concluir que, por el momento, la explotación intensiva no ha tenido un impacto severo sobre el estado del acuífero, situación que puede atribuirse a una gestión correcta de la demanda. Sin embargo, para lograr el mejoramiento del estado del sistema será necesaria una reducción de los volúmenes extraídos, a partir de la disponibilidad de fuentes de abastecimiento complementarias.

AGRADECIMIENTOS

La Cooperativa de Obras y Servicios Públicos de General Pico (CORPICO) y la Administración Provincial del Agua (APA) de La Pampa, facilitaron la información requerida para este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Afshar, A., Mariño, M. A., Ebtehaj, M. y Moosavi, J. (2007). Rule-based fuzzy system for assessing groundwater vulnerability. *Journal of Environmental Engineering*, 133 (5), 532–540. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2007\)133:5\(532\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2007)133:5(532))

Alley, W. M., Clark, B. R., Ely, D. M. y Faunt, C. C. (2017). Groundwater Development Stress: Global-Scale Indices Compared to Regional Modeling. *Ground Water*, 56 (2), 266-275. <https://doi.org/10.1111/gwat.12578>

Aullon Alcaine, A., Schulz, C., Bundschuh, J., Jacks, G., Thunvik, R., Gustafsson, J. P., Morth, C. M., Sracek, O., Ahmad, A. y Bhattacharya, P. (2020). Hydrogeochemical controls on the mobility of arsenic, fluoride and other geogenic co-contaminants in the shallow aquifers of northeastern La Pampa Province in Argentina. *Science of The Total Environment*, 715 (2020), 136671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136671>

Bagheri, A., Asgary, A., Levy, J., y Rafieian, M. (2006). A performance index for assessing urban water systems: A fuzzy inference approach. *Journal-American Water Works Association*, 98 (11), 84-92. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07807.x>

Baturone, I., Moreno-Velo, F., Sánchez-Solano, S., Barriga, A., Brox, P., Gersnoviez, A. y Brox, M. (2007). *Using Xfuzzy Environment for the Whole Design of Fuzzy Systems*. Conference Paper in

- IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Londres, Inglaterra.
<https://doi.org/10.1109/FUZZY.2007.4295420>
- Bockstaller, C. Beauchet, S., Manneville, V., Amiaud, B. y Botreau, R. (2017).** A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling & Software*, 97, 130-144.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.011>
- Caniani, D., Lioi, D. S. Mancini, M. I., y Masi, S. (2015).** Hierarchical Classification of Groundwater Pollution Risk of Contaminated Sites Using Fuzzy Logic: A Case Study in the Basilicata Region (Italy). *Water*, 7 (12), 2013-2036. <https://doi.org/10.3390/w7052013>
- Chanapathi, T., Thatikonda, S., Pandey, V. P., y Shrestha, S. (2018).** Fuzzy-based approach for evaluating groundwater sustainability of Asian cities. *Sustainable Cities and Society*, 44, 321-331.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.027>
- Custodio Gimena, E. (2015).** *Explotación intensiva y minera de las aguas subterráneas: situación general y particular de España: ¿una bendición o una calamidad?* Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp), 108 (1-2), 13-20.
- Custodio, E., Kretsinger, V. y Llamas, M. R. (2005).** Intensive development of groundwater: concept, facts and suggestions. *Water Policy* 7, 151–162. <https://doi.org/10.2166/wp.2005.0010>
- Dahiya, S., Singh, B., Gaur, S., Garg, V. K., y Kushwaha, H. S. (2007).** Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 147 (3), 938-946.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.119>
- Dixon, B. (2005).** Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, 25 (4), 327-347. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.07.002>
- Duhalde, D. J., Arumí, J. L., Oyarzún, R. A. y Rivera, D. A. (2018).** Fuzzy-based assessment of groundwater intrinsic vulnerability of a volcanic aquifer in the Chilean Andean Valley. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190 (7), 390. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6758-4>
- Fleming, S. W., Wong, C. y Graham, G. (2014).** The unbearable fuzziness of being sustainable: an integrated, fuzzy logic-based aquifer health index. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (6), 1154-1166.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.907496>
- Gain, A. K., Giupponi, C., y Wada, Y. (2016).** Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*, 11 (12), 124015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>
- Gemitzi, A., Petalas, C., Tsihrintzis, V. A. y Pissinaras, V. (2006).** Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. *Environmental Geology*, 49 (5), 653–673. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0104-1>
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., van Beek, L. P. H. (2012).** Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488, 197-200.
<https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., y Perrone, D. (2020).** Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Jha, M. K., Shekhar, A., y Jenifer, M. A. (2020).** Assessing groundwater quality for drinking water supply using hybrid fuzzy-GIS-based water quality index. *Water Research*, 115867.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115867>
- Jamshidzadeh, Z. y Barzi, M. T. (2018).** Groundwater quality assessment using the potability water quality index (PWQI): a case in the Kashan plain, Central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77 (3), 59. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7237-5>
- Jinturkar, A. M., Deshmukh, S. S., Agarkar S. V. y Chavhan, G. R. (2010).** Determination of water quality index by fuzzy logic approach: a case of ground water in an Indian town. *Water Science and Technology*, 6 1(8), 1987–1994. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.095>
- Kamrani, S., Rezaei, M., Amiri, V., y Saberinasr, A. (2016).** Investigating the efficiency of information entropy and fuzzy theories to classification of groundwater samples for drinking purposes: Lenjanat

Plain, Central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75 (20), 1370. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6185-1>

Lavapuro, M., Lipponen, A., Artimo, A. y Katko, T. S. (2008). Groundwater sustainability indicators: testing with Finnish data. *Boreal Environment Research*, 13, 381–402.

Llamas M. R., Martinez-Santos y de la Hera P. A. (2006). *The Manifold Dimensions of Groundwater Sustainability: An Overview*. International Symposium on Groundwater Sustainability, (pp. 1-15). Alicante, España.

Mariño, E. E. y Dalmaso, M. G. (2003). *Análisis de la información básica para la gestión del acuífero que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina*. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en hidrología subterránea, (Tomo 1, pp. 209-218). Rosario, Argentina.

Mariño, E. E., Teijón Ávila, G., Bhattacharya, P. y Schulz, C. J. (2020). The occurrence of arsenic and other trace elements in groundwaters of the southwestern Chaco-Pampean plain, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 100 (2020), 102547. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102547>

Massara, N., Mariño, E., Ceballo, L. y Schulz, C. (2015). *Estimación de la recarga en áreas medanosas del noreste de la provincia de La Pampa*. XXV Congreso Nacional del Agua, Paraná, Argentina.

Massone, H., Meschino, G., Lima, L., Albornoz, D., Barilari, A., y Damiano, F. (2013). *Aplicación de lógica difusa en la evaluación de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea*. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología subterránea, La Plata, Argentina.

Medus, M., Mariño, E. E. y Schulz, C. J. (2005). *Variación temporal de los contenidos de arsénico en la batería de pozos que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina*. En G. Galindo, J. L. Fernández Turiel, M. A. Parada y D. G. Torrente (Eds.), *Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento*, IV Congreso Hidrogeológico Argentino, (pp. 73-81). Río Cuarto, Argentina.

Mohammadi, K., Niknam, R. y Majd, V.J. (2009). Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: A case study in Tehran-Karaj aquifer, Iran. *Environmental Geology*, 58 (2), 437–446. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1514-7>

Naaz, S., Alam, A., y Biswas, R. (2011). Effect of different defuzzification methods in a fuzzy based load balancing application. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 8 (5), 261.

Nadiri, A. A., Gharekhani, M., Khatibi, R., y Moghaddam, A. A. (2017). Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (9), 8562-8577. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8489-4>

Nasiri, F., Huang, G., y Fuller, N. (2007). Prioritizing groundwater remediation policies: a fuzzy compatibility analysis decision aid. *Journal of Environmental Management*, 82 (1), 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.001>

Nobre, R.C.M., Rotunno Filho, O. C., Mansur, W. J., Nobre, M. M. M., y Cosenza, C. A. N. (2007). Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94 (3-4), 277–292. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.07.008>

Pandey, V. P., Shrestha, S., Chapagain, S. K. y Kazama, F. (2011). A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental Science & Policy*, 14 (4), 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.03.008>

Pathak, D. R. y Hiratsuka, A. (2011). An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making. *Journal of Hydro-environment Research*, 5 (1), 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.10.015>

Ross, T. J. (2012). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Tercera Edición. Wiley, Nueva York.

Schulz, C.J., Castro, E., Mariño, E. y Dalmaso, M.G. (2001). *Occurrence of fluoride in groundwater for human consumption in the province of La Pampa, Republica Argentina*. En: Seiler, K. P. y Wohnlich, S. (Eds.), *New Approaches Characterizing Groundwater Flow* (Vol. 1, pp. 637–639). A.A. Balkema Publisher, Países Bajos.

Smedley, P.L., McDonald, D.M.J., Nicolli, H.B., Barros, A.J., Tullio, J.O., Pearce, J.M. (2000). *Arsenic and Other Quality Problems in Groundwater from Northern La Pampa Province, Argentina.* British Geological Survey, Technical Report WC/99/36, Reino Unido.

Şen, Z., 2009. Fuzzy groundwater classification rule derivation from quality maps. *Water Quality, Exposure and Health*, 1 (2), 115–122. <https://doi.org/10.1007/s12403-009-0011-x>

Singh, B., Dahiya, S., Jain, S., Garg, V. K. y Kushwaha, H. S. (2008). Use of fuzzy synthetic evaluation for assessment of groundwater quality for drinking usage: a case study of Southern Haryana, India. *Environ Geol* 54 (2), 249–255. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0812-9>

Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam). (2015). *Inventario de los Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa - Etapa I.* Secretaria de Recursos Hídricos, La Pampa, Argentina.

Vadiati, M., Asghari-Moghaddam, A., Nakhaei, M., Adamowski, J., y Akbarzadeh, A. H. (2016). A fuzzy-logic based decision-making approach for identification of groundwater quality based on groundwater quality indices. *Journal of environmental management*, 184, 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.082>

Vrba, J. y Lipponen, A. (2007). *Groundwater resources sustainability indicators.* UNESCO, IAEA, IAH. IHP-VI, Series on Groundwater N° 14.

Yin, D., Shu, L., Xu, C., Wang, Z., y Appiah-Adjei, E. K. (2012). An approach for estimating sustainable yield of karst water in data sparse regions. *Environmental Earth Sciences*, 66 (2), 399-407. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1247-x>

Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets.* *Information and Control*, 8 (3): 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zadeh, L. A. (2008). Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, 178 (13), 2751–2779. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.02.012>

Trabajo recibido el 12/04/2022 y aprobado para su publicación el 21/06/2022.

Cómo citar este artículo

Mariño, E.E.; Ceballo, L.; Loyola, N.L.; Pechín, P; Gandi, C.; Gagino, M. (2022). Formulación de un índice de estado del acuífero para gestionar zonas con explotación intensiva, *Revista Argentina de Hidrogeología*, 1:20-30

ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO MULTIUNITARIO SUPERIOR Y SU RELACIÓN CON LA EXPLOTACIÓN INTENSIVA DE AGUA, CHUBUT. ARGENTINA

HYDROGEOLOGICAL ANALYSIS OF THE UPPER MULTIUNIT AQUIFER AND ITS RELATIONSHIP WITH INTENSIVE WATER EXPLOITATION, CHUBUT. ARGENTINA

Mario Grizinik*¹ y Pablo Correia¹

¹Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Campus Km 4. 9000 Comodoro Rivadavia, Chubut. Argentina.

*Autor de correspondencia grizinikmario@gmail.com

RESUMEN

En la región sudeste de la provincia de Chubut, Argentina, una parte del abastecimiento de agua al sector Norte de la ciudad de Comodoro Rivadavia, se realiza a través de perforaciones del Acuífero Multiunitario Superior, situadas en la zona de Manantiales Behr, a 30 km al Noroeste de la misma. Numerosas investigaciones han demostrado la existencia de aguas antiguas, mediante el estudio de isótopos ambientales, Tritio, Deuterio y O¹⁸, y recargas localizadas a través de precipitaciones nivales. Mediciones mediante Carbono¹⁴, permitieron establecer edades mayores a 12.000 años A.P. El sistema aporta un caudal promedio de 12.000 m³/día desde hace 60 años, en una región donde las precipitaciones anuales promedian los 230 mm/año, con una infiltración estimada de 21 mm/año. Se han analizado los comportamientos de los niveles estáticos en dichos pozos, desde 1950 a la actualidad y se obtuvieron datos de descensos de profundidad de hasta 60 metros en algunos casos, que muestran la explotación intensiva que es sometido el sistema. Debe ser prioritaria, la realización del balance hídrico del sistema acuífero que permita conocer con mayor aproximación los volúmenes involucrados en cada uno de sus componentes y de esa forma, poder encarar un plan de gestión sostenible en el tiempo. De persistir las condiciones de avance en los procesos de desertificación, demanda de agua por aumento de población y cambio climático, esta explotación se transformará rápidamente en minería del agua subterránea en la región.

Palabras clave

Aguas subterráneas – Explotación intensiva – Patagonia.

Abstract

In the southeastern region of the province of Chubut, Argentina, part of the water supply to the northern sector of the city of Comodoro Rivadavia is carried out through perforations of the “upper multiunit aquifer”, located in the area of Manantiales Behr, 30 km northwest of it. Numerous investigations have demonstrated the existence of ancient waters, through the study of environmental isotopes, Tritium, Deuterium and O¹⁸, and localized recharges through snowfall. Measurements using Carbon 14, allowed to establish ages greater than 12,000 years A.P. The system has provided an average flow of 12,000 m³/day for 60 years, in a region where annual rainfall averages 230 mm/year, with an estimated infiltration of 21 mm/year. The behavior of the static levels in these wells has been analyzed from 1950 to the present and data on depth drops of up to 60 meters in some cases were obtained, which show an intensive exploitation process to which the system is subjected. It must be a priority, the realization of the water balance of the aquifer system that allows to know with greater

approximation the volumes involved in each of its components and in this way, to be able to make a sustainable management plan over time. If the conditions of progress in the processes of desertification, demand for water due to population growth and climate change persist, this exploitation will quickly transform into underground water mining in the region.

Keywords

Groundwater – Intensive exploitation – Patagonia

INTRODUCCIÓN

Las ciudades de Comodoro Rivadavia y Rada Tilly, en la zona costera, en el sudeste de la provincia de Chubut, se abastecen principalmente de agua procedente del Lago Muster, distante a 150 km al Oeste, a través de dos acueductos uno antiguo y otro relativamente nuevo, que bombean el agua a través de una topografía muy irregular y un caudal cercano a los 100.000 m³/día. Otro sector de la parte Norte de la ciudad se halla abastecido mediante agua subterránea procedente de pozos ubicados en la zona de Manantiales Behr, distante a 30 km al Norte y con un caudal promedio desde hace más de 60 años de 12.000 m³/día. Otro acueducto proveniente de la zona de El Trébol, aporta 3.000 m³/día al riego del Cordón Forestal (Figura 1). Los recursos hídricos subterráneos de la región se hallan mayormente alojados en sedimentos terciarios y depósitos gradacionales terrazados que cubren la zona sureste de la provincia de Chubut y Noreste de Santa Cruz.

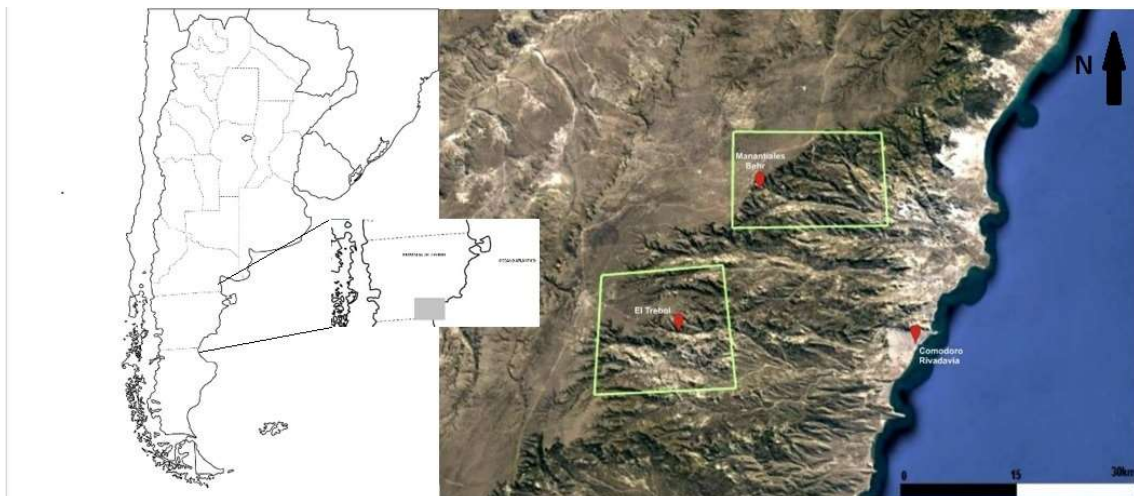


Figura 1. Ubicación de las áreas El Trébol y Manantiales Behr, donde se extrae agua subterránea para abastecimiento de la ciudad de Comodoro Rivadavia.

Esta zona comprende la Fm. Patagonia y la Fm. Santa Cruz, principales portadoras de los recursos hídricos subterráneos de la región, donde se presentan espesores útiles de entre 300 hasta 500 metros, conteniendo un sistema acuífero con aguas de excelente calidad.

En la provincia de Chubut, involucra una amplia franja que se extiende desde el límite con la provincia de Santa Cruz al Sur (zona de Holdich los mayores espesores), hasta las cercanías del Pico Salamanca, abarcando las denominadas “Pampas” del Castillo, Pampa de Salamanca y Pampa Malaspina al Noreste.

La escasez de precipitaciones, concentrada principalmente en la temporada invernal, actúa de manera excluyente en el proceso de recarga del sistema acuífero subsuperficial. Las características de aridez propias de la región constituyen uno de los aspectos más

importantes que condiciona la presencia, disponibilidad y quimismo del recurso hídrico subterráneo, asociado conjuntamente con la diversidad de ambientes geológicos, formaciones y tipos litológicos involucrados.

La Fm. Patagonia y la Fm. Santa Cruz cuando se hallan presentes, por sus características hidrolíticas e hidroestratigráficas constituyen el complejo sedimentario por excelencia para la prospección y explotación de aguas subterráneas en este sector de la provincia. Estos depósitos presentan potencialmente el mayor interés cuando se hallan presentes los términos medio a superior de la secuencia. Poseen circulación de aguas de buena calidad, que afloran en los faldeos de los cañadones en forma de manantiales. Los análisis químicos de muestras de agua de niveles del Patagoniano profundo arrojan valores de sólidos totales disueltos de 300 a 500 mg/L. La mayoría de ellas son del tipo bicarbonatadas sódicas a bicarbonatadas cloruradas sódicas, encontrándose que a medida que se desciende topográficamente hacia la costa, se incrementa la salinidad, llegando en algunos casos a superar los 8.000 mg/L. Las aguas subterráneas colectadas a 250 metros de profundidad, conteniendo 300 mg/L de sólidos disueltos totales, en la zona de Pampa del Castillo y Cañadón El Trébol han sido datadas con Carbono 14, y acusaron edades de 12.300 a 12.800 años de antigüedad (Griznik y Sontag, 1994), denotando una recarga asociada a períodos posglaciales, motivo por el cuál es importante proteger este recurso.

Se considera que hay minería del agua subterránea cuando las extracciones superan a la recarga, y se produce una continuada disminución de las reservas (Custodio, 2015).

METODOLOGÍA

Se han analizado las principales características geológicas y geomorfológicas que definen el continente de circulación del flujo subterráneo, y se ha recurrido a innumerables estudios hidrogeológicos en el área, hidroquímicos e isotópicos de muestras extraídas en diferentes campañas y por distintos organismos y empresas.

Una primera referencia a las variaciones de los niveles piezométricos se encuentra en el Informe realizado por el Geólogo Alejandro Simeoni para la Dirección de Recursos Hídricos de la Provincia de Chubut, donde se presentan perfiles piezométricos desde 1950 a 1986, en los cuales se observan las disminuciones de dichos niveles, como consecuencia de la extracción de agua subterránea (Simeoni, 1986). Los trabajos efectuados por el CRAS (Centro Regional de Aguas Subterráneas de San Juan), además de completos y con información detallada de las características hidrogeológicas del acuífero en Manantiales Behr, ya alertaban sobre cierta vulnerabilidad en la explotación del recurso (Salvioli *et al.*, 1987). Desde la década de 1980 la intensificación de trabajos e investigaciones sobre las aguas subterráneas en la región del Golfo San Jorge, provincias de Chubut y Santa Cruz, fueron acompañadas de estudios isotópicos de diferentes niveles del sistema acuífero de la región.

En la zona de Pampa del Castillo y El Trébol (Levin *et al.*, 1987a), por convenio entre la UNPSJB (Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco) y el INGEIS Instituto Nacional de Geocronología Isotópica), se efectuaron relevamientos de campo con muestreos de aguas para análisis isotópicos y determinaciones hidroquímicas, a los fines de conocer las condiciones de recarga del sistema acuífero. Los resultados no evidenciaron recarga reciente, así como tampoco niveles de Tritio por encima de 0 UT (Unidades Tritio), en manantiales de la Formación Santa Cruz en la zona de El Trébol y El Tordillo, considerando entonces que la infiltración del agua de recarga era muy lenta o que la recarga no era significativa respecto al volumen de agua almacenada en las formaciones productivas del definido Acuífero Multiunitario Superior (Castrillo *et al.*, 1984). Otras tareas de muestreo

y medición del contenido isotópico, ^{18}O , ^2H y Tritio en la zona de Manantiales Behr (Levin *et al.*, 1987b), realizadas en convenio con el CRAS (provincia de San Juan), son coincidentes en las conclusiones con las reportadas para la zona de El Trébol-El Tordillo donde las concentraciones del isótopo radiactivo del Hidrógeno, ^3H , de la mayoría de los pozos muestreados y confiables, coinciden que la recarga no es significativa o que el tiempo de tránsito desde la zona de recarga hasta la zona de muestreo, es mayor de 30 años.

Se analizaron los datos existentes sobre mediciones de los niveles estáticos de los pozos de agua, en la zona de Manantiales Behr y El Trébol en distintos períodos desde 1950 a la actualidad. Esta información es errática e incompleta, siendo descartadas algunas mediciones que presentaban serias dudas sobre su veracidad. Las series hidroquímicas de los sucesivos muestreos de las aguas subterráneas permiten observar en todos los casos, una constancia en los valores de salinidad y contenido iónico. Las mediciones a lo largo de más de 70 años no registran variaciones superiores al 5%.

RESULTADOS

Climatología

La caracterización general de este tópico fue realizada en base a los datos de la Estación Comodoro Rivadavia, del Servicio Meteorológico Nacional y ubicada en la estación aérea local. Esta estación es la más cercana al área de estudio. Cabe acotar las diferencias existentes entre esta estación con fuerte influencia del mar (Cota de 46 msnm) y los valores de cota de la Pampa del Castillo, variables entre 600 y 750 msnm. El promedio anual de precipitaciones de acuerdo a esta estación meteorológica para el período 1930-2012, corresponde a un valor de 229,3 mm. (Chachero, 2014). Las mayores precipitaciones corresponden a los meses de menor temperatura (Otoño e Invierno), que concentran un 65% de la lluvia caída, mientras que en los meses más cálidos (Primavera y Verano), se registran las menores porcentajes de precipitación alcanzando sólo el 35% del total.

En los meses de Enero, Febrero, Marzo y Abril la Evapotranspiración Real es igual a la Precipitación y la recarga que se produciría en los meses de Mayo, Junio y Julio sería del orden de los 21 mm (valor medio anual), (Salvioli *et al.*, 1987). En cuanto a la temperatura, el mes de Enero presenta un promedio de 25°C mientras que Julio muestra 3°C, con un promedio anual de 12 °C.

Geología

Se describen en forma somera las principales formaciones geológicas que se desarrollan en la zona y su vinculación con la hidrogeología de los sectores de interés. Se puede observar el Mapa Geológico, (Figura 2) y el Cuadro Estratigráfico (Figura 3).

-Formación Río Chico. Terciario (Paleoceno):

La mayor ocurrencia de estos depósitos, corresponde a los flancos de suaves lomadas al Este y Norte de la zona del Pico Salamanca, varios kilómetros al Norte del área de estudio, donde se ubica por debajo del manto de rodados que se encuentra en la porción superior de la meseta. Están conformados principalmente por arcilitas y tobas arenosas de tonalidades pardas a rojizas, finas a medianas, con alta participación arcillosa. Presentan espesores variables y desarrollo de fracturas concoideas en los niveles de mayor participación arcillosa. Su desarrollo se encuentra restringido a dichos asomos ya fuera del área de trabajo, y su presencia se produce en el subsuelo, al ser atravesado por las perforaciones. Cuando se halla ausente la Formación Sarmiento, constituye el hidroapoyo del Sistema Acuífero.

-Formación Sarmiento. Terciario (Eoceno):

Su presencia al igual que la formación anterior, se halla restringida a la secuencia atravesada por las perforaciones y no aflora en el área de trabajo. Aparecen afloramientos más al Este desde la zona de Km 5 hacia Caleta Córdoba. Infrayace a la Formación Patagonia y formada por tobas pobremente seleccionadas de tonalidades blancoamarillentas a gris verdosa. Están constituidas mayoritariamente por arcillitas tobáceas y tobas arenosas. En su sección media a inferior presenta concreciones nodulares limoníticas y pátinas con óxidos de manganeso. Por sectores presenta intercalaciones de sedimentitas de origen eólico, y el conjunto actúa como acuitardo y sustrato impermeable del sistema acuífero en la región. Se le asigna una edad Eocena.

-Formación Patagonia. Terciario (Oligoceno):

Estos depósitos de amplio desarrollo regional, constituyen la principal formación de la zona y se presentan formando el cuerpo principal del relieve mesetiforme. Sus afloramientos son observables sobre los faldeos erosionados de las lomadas principales o en los flancos de los cañadones que disectan el cuerpo de mesetas. Asimismo, la mayoría de las perforaciones efectuadas en estos yacimientos, revelan su presencia, desde algunos metros desde boca de pozo, hasta en algunos casos los 300 metros de profundidad. Esta formación se halla constituida mayormente por bancos de areniscas pardas de estratificación masiva, lentes limoarcillosos e intercalaciones en distintos niveles. En general presentan cierta continuidad areal en la presencia de potentes paquetes de arenas y areniscas medianas a finas, con intercalaciones de lentes y bancos limoarcillosos. Estas sedimentitas de origen marino, corresponden a una secuencia transgresiva con aumento de granulometría hacia el techo de la formación. Presenta dos tramos muy diferenciados, uno inferior de 50 a 60 metros de potencia con predominio de materiales muy finos, limoarcillosos y muy baja permeabilidad, con características acuitardas y el superior con predominio arenoso de mayor permeabilidad y es el que reúne las mejores condiciones acuíferas. Estos niveles son los que se aconsejan para su explotación. El tramo inferior como se menciona precedentemente se comporta como un acuitardo, limitando en profundidad la existencia de agua dulce.

-Formación Santa Cruz (Mioceno)

Esta formación se halla depositada de forma discordante sobre los depósitos de la Fm. Patagonia, posee espesores mucho menores que la formación infrayacente y posee una distribución espacial mucho más limitada, litológicamente está compuesta por arenas fluviales, sedimentos eólicos y pelitas. Se encuentra constituida por areniscas medianas a gruesas amarillentas a grisáceas, con frecuentes intercalaciones de niveles conglomerádicos. Son sedimentos fluvioeólicos que presentan una marcada estratificación entrecruzada de edad Miocena. Constituyen niveles de mayor permeabilidad que aquellos de la Formación Patagonia y sus caudales de explotación son más importantes.

-Niveles Terrazados. Cuaternario (Pleistoceno Holoceno):

Estos depósitos cubren la mayor parte del área de estudio, conformando diversos niveles de terrazas, ocupando la totalidad de los yacimientos en dos niveles bien diferenciados. El nivel principal más elevado, asociado al área de estudio, corresponde a los denominados Rodados Tehuelches. Estos mantos tabulares, se componen de gravas arenosas y arenas gravosas. Los primeros metros se hallan cementados con material carbonático-caolinítico, lo que contribuye a su consolidación. Niveles terrazados a menor altitud se distribuyen rodeando los bordes de la pampa, en espesores más reducidos y constituyendo bancos de rodados redepositados.

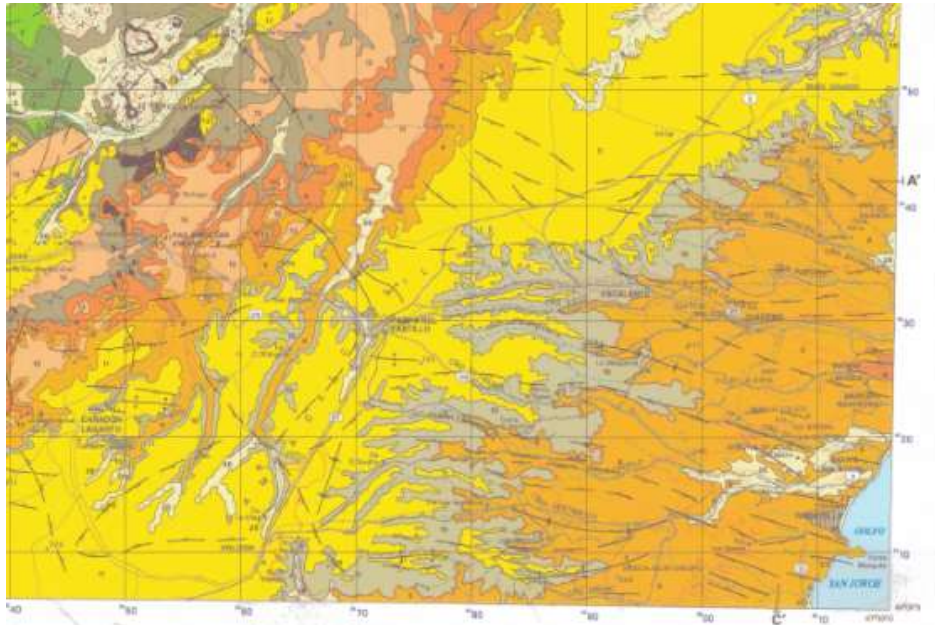


Figura 2. Mapa geológico de la región. Tomado de Sciuoto (2000).

CUADRO ESTRATIGRAFICO

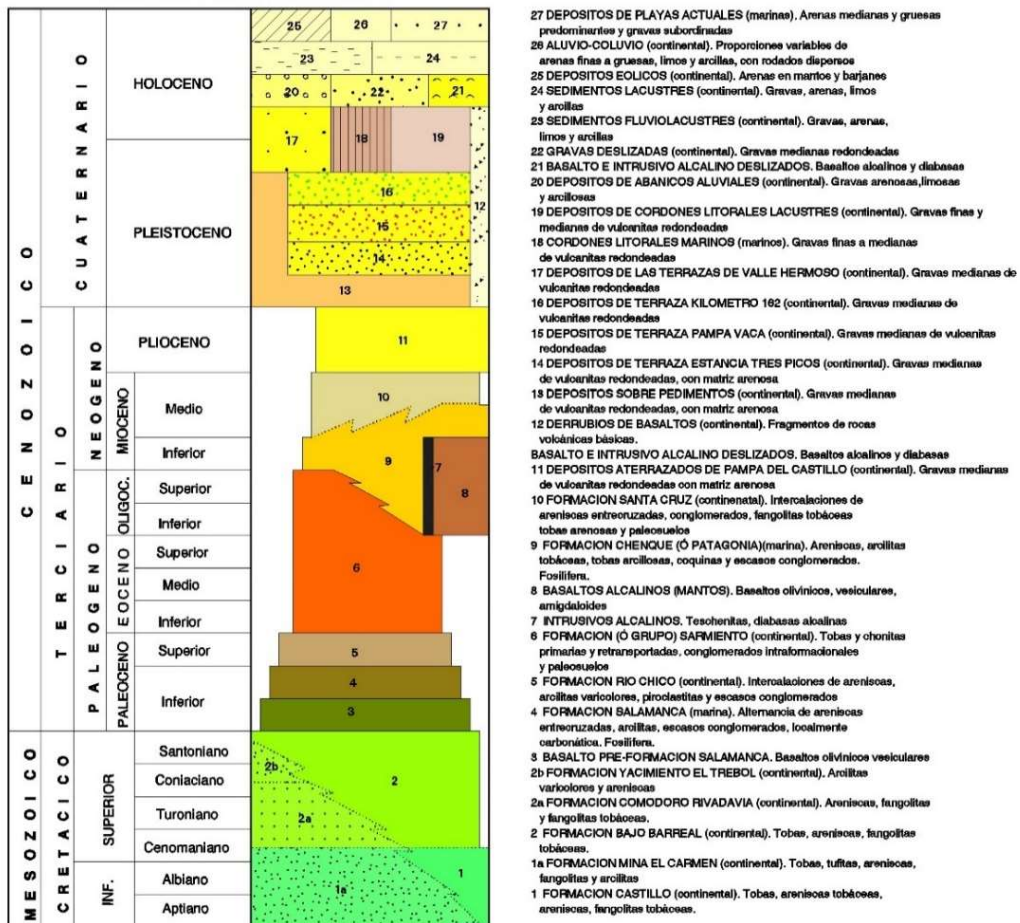


Figura 3. Cuadro Estratigráfico de la región. Tomado de Sciuoto (2000).

Con respecto a las características geológicas de la zona de meseta y su vertiente atlántica, en el cuadro estratigráfico siguiente (Tabla 1), se sintetizan las unidades geológicas aflorantes y sus características hidráulicas.

Tabla 1. Unidades geológicas aflorantes y sus características hidráulicas

Período	Época	Unidad	Litología y características hidráulicas
Cuaternario	Holoceno		Sedimentos aluviales y coluviales recientes y subrecientes, depósitos de valle. Importantes zonas de conducción hídrica.
	Pleistoceno		Cordones litorales, Rodados Patagónicos retransportados. Depósitos muy porosos que conforman áreas de recarga local y regional.
Terciario	Mioceno	Fm. Santa Cruz	Areniscas medianas a gruesas con intercalaciones pelíticas
	Oligoceno	Fm. Patagonia	Cineritas, areniscas, areniscas calcáreas y arcillas con bancos de ostras y otros fósiles marinos. Presenta acuíferos de importancia en los términos medio y superior de bajo tenor salino aumentando en profundidad.
		Eoceno	
			Fm. Sarmiento
Cretácico		Grupo Chubut	Depósitos tobáceos con intercalaciones de areniscas. Circula aguas salobres presentando permeabilidad secundaria.

Geomorfología

Geomorfológicamente la zona de estudio está compuesta por dos unidades principales, una conformada por el relieve mesetiforme que domina ampliamente en la región y otra conformada por los cañadones, producto de la acción fluvial sobre el conjunto de estratos sedimentarios horizontales. Sobre estos cañadones se deposita una fina capa de coluvio y aluvio con amplia participación arenosa.

El relieve mesetiforme se presenta a partir de la Pampa del Castillo, que conforma una meseta subhorizontal de 650 msnm de suave pendiente al Noreste del 0,2 al 0,3%. Se halla coronada por un manto de gravas, denominado Rodados Tehuelches, con una matriz calcárea-caolinítica en los primeros 5 a 10 metros. Son de características fluvio-glaciales y constituyen la zona de infiltración y recarga del sistema acuífero. Pueden llegar a constituir espesores de 10 a 30 metros y en algunos sectores contienen a la capa freática.

Toda la extensión al Sureste de la Pampa del Castillo presenta un relieve muy irregular por la existencia de numerosos valles, que se orientan de Oeste a Este, Dichos valles, conocidos localmente como cañadones, son el producto de erosión fluvial en épocas pasadas donde el clima era mucho más húmedo que el actual.

El paisaje en el sector Oeste y Sureste del Nivel Terrazado Pampa del Castillo se encuentra disectado por numerosos cañadones, los cuales presentan distinto desarrollo y dimensiones, con lo cual encontramos cañadones principales y secundarios. Los mismos se desarrollaron por erosión retrocedente de los bordes de terrazas, producto de la erosión hidroéolica.

Los cañadones principales son predominantemente subparalelos entre sí, de orientación NW-SE y en ocasiones exhiben laderas de fuertes pendientes. Se destacan entre

ellos el cañadón El Trébol y los Cañadones Buena Esperanza- El Tordillo ubicados al Sureste. En tanto al Norte del nivel terrazado se circunscribe en el área a la zona de Pampa del Castillo cuya orientación es SW-NE. Actualmente los cañadones están secos, a excepción de la circulación de aguas provenientes de los manantiales en sus laderas, pero resulta evidente que fueron cauces de ríos caudalosos, en períodos posglaciales y un pasado con precipitaciones mucho mayores que las actuales.

El relieve de meseta se desarrolla en la Pampa del Castillo; el cambio abrupto de pendiente, se produce entre 650 y 700 m, la superficie de erosión hídrica y de remoción en masa, ocupa los interfluvios y los sectores de conexión entre éstos y los cañadones; los depósitos aluviales, que en general poseen poco espesor, se ubican en las zonas bajas de relleno de los cañadones. Resulta importante señalar que la conformación geomorfológica ejerce un notorio control en el comportamiento hidrodinámico subterráneo, pues las divisorias superficiales coinciden con las subterráneas y las vaguadas de los cañadones, con los ámbitos de descarga natural del acuífero. Otros sitios de descarga subterránea natural son los manantiales, que en general coinciden con el contacto entre la sección superior arenosa y más permeable y la inferior arcillosa y menos permeable, ambas de la Fm. Patagonia (Auge, 2007).

Sistema Acuífero Multiunitario Superior (o Acuífero del Patagoniano)

Esta denominación de Acuífero Multiunitario Superior (Castrillo *et al.*, 1984), corresponde al conjunto sedimentario constituido por las formaciones Patagonia, Santa Cruz y los Rodados Tehuelches, abarcando además, a los depósitos aluviales de relleno de cañadones que se hallan conectados hidráulicamente. Por años, ha sido también conocido como “Acuífero del Patagoniano”, término que se maneja aún hoy indistintamente (Tabla 2).

Tabla 2. Cuadro Hidroestratigráfico

Edad		Unidades litoestratigráficas	Litología	Comportamiento Hidrodinámico	
Cuaternario	Holoceno	Depósitos modernos	Gravas arenosas con matriz arcillosa	Acuífero frático	Acuífero multiunitario superior
	Holoceno inferior	Rodados patagónicos	Gravas y arcillas	Acuífero frático	
Terciario	Príoceno				
	Mioceno	Fm. Santa Cruz	Arenas fluviales	Acuífero regional	
	Oligoceno superior/ mioceno	Fm. Patagonia	Areniscas y niveles tobaceos con intercalaciones arcillosa	Acuífero regional	
	Oligoceno Eoceno	Fm. Sarmiento	Tobas y arcillas tobaceas	Acuitardo	

Los niveles terrazados superiores con espesores de grava de entre 5 a 10 m, configuran las áreas de recarga del sistema. La Pampa del Castillo-Pampa de Salamanca presentan divergencia del flujo tanto hacia el oeste, como hacia el este (Figura 4). reflejando el carácter de divisoria del escurrimiento subterráneo (coincidente con la divisoria superficial), del Acuífero Multiunitario Superior. Estas características, junto a la diferenciación hidroquímica que presentan las aguas circulantes, permiten su agrupamiento en un Sistema Hidrogeológico Multiunitario (Castrillo *et al.*, 1984), que se identifica con el medio sólido en el cual circulan dichas aguas. En la Figura 5, se muestra un corte esquemático del sistema, reflejando la circulación del flujo subterráneo desde la pampa hasta su descarga en el mar. Se aprecia un “Flujo Local” en las zonas altas del perfil. Éstas

están limitadas a una recarga autóctona, con infiltración durante la temporada invernal, recorrido de corta extensión y aparición en superficie, a través de manantiales o mallines.

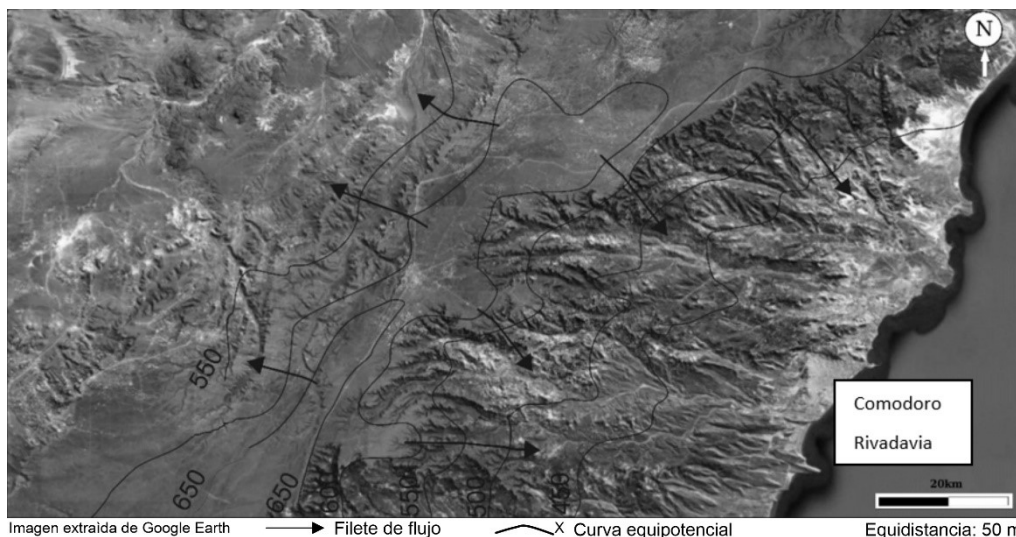


Figura 4. Mapa equipotencial del sector SE de Chubut. Tomado de Grizinik *et al.* 2021.

El “Flujo Regional” o más profundo se halla limitado a la circulación de las aguas subterráneas en el ámbito de la Formación Patagonia. En esta zona, se desarrollan los términos medio y superior de esta formación, cubierta por gravas arenosas correspondientes a los denominados “Rodados Patagónicos”, en diversos escalones mesetiformes, siendo dominante y de mayor altitud, la denominada “Pampa del Castillo”.



Figura 5. Perfil esquemático del Sistema Multiunitario. Modificado de Castrillo *et al.* (1984).

A través del análisis e interpretación de los perfiles eléctricos de los pozos de la industria petrolera, de los pozos existentes productores de agua, y la información de base respecto de las características hidrogeológicas, se arriba a un adecuado conocimiento de las condiciones imperantes en el área (Figura 6).

La región presenta un suave levantamiento de la base de la Formación Patagonia y todo el paquete acuífero desde la costa hacia el Oeste-Noroeste, dando lugar a la conformación de una suave estructura homoclinal, que es coincidente con la ingresión del mar Patagónico.

La base de estos depósitos de la Formación Patagonia, varían desde los 200 m.s.n.m. en la zona de Manantiales Behr, y desde 150 m.s.n.m. en el comienzo del cañadón El Trébol hasta los 450 m.s.n.m. en el Oeste de la Pampa del Castillo.

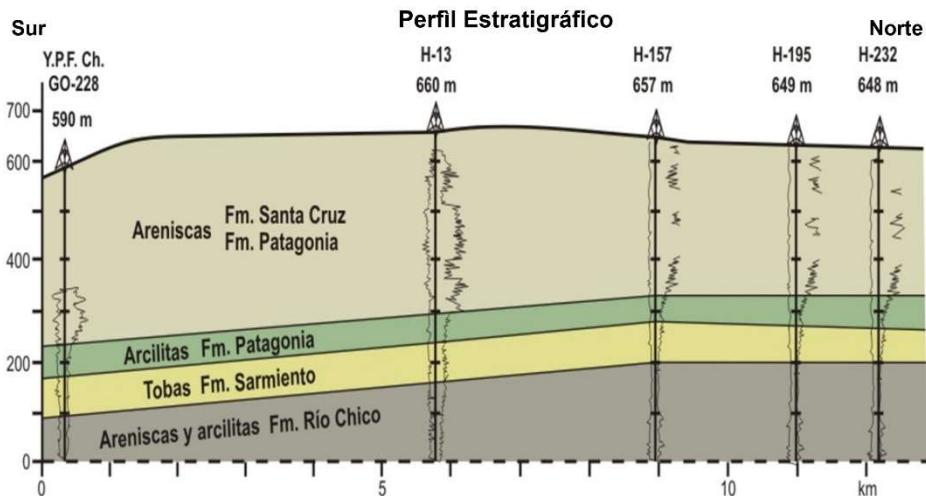


Figura 6. Perfil en base al registro eléctrico de pozos de un sector del área Manantiales Behr

El mapa isopáquico exhibe un comportamiento genéricamente coincidente con las geoformas actuales, determinando zonas de mayor espesor elongadas según la distribución de la “pampas”, con un decrecimiento paulatino en dirección Noreste y más pronunciado hacia el Este y Oeste. Presenta algunas zonas de espesor máximo, como las ubicadas en la zona de Holdich, entre Cañadón Las Margaritas y estancia El Trébol, y en la confluencia de Cañadón El trébol y Cañadón Buena Esperanza (Castrillo *et al.*, 1984).

Con el mismo criterio, en la obtención de los datos de la base y tomando las cotas correspondientes a la boca de cada pozo, se obtuvieron los espesores útiles correspondientes a la suma de la formación Patagonia, formación Santa Cruz más el espesor de los rodados o material de relleno moderno que lo cubre. De esta manera se confeccionó el Plano de Espesor útil del Patagoniano, observándose el correspondiente al área El Trébol (Figura 7).

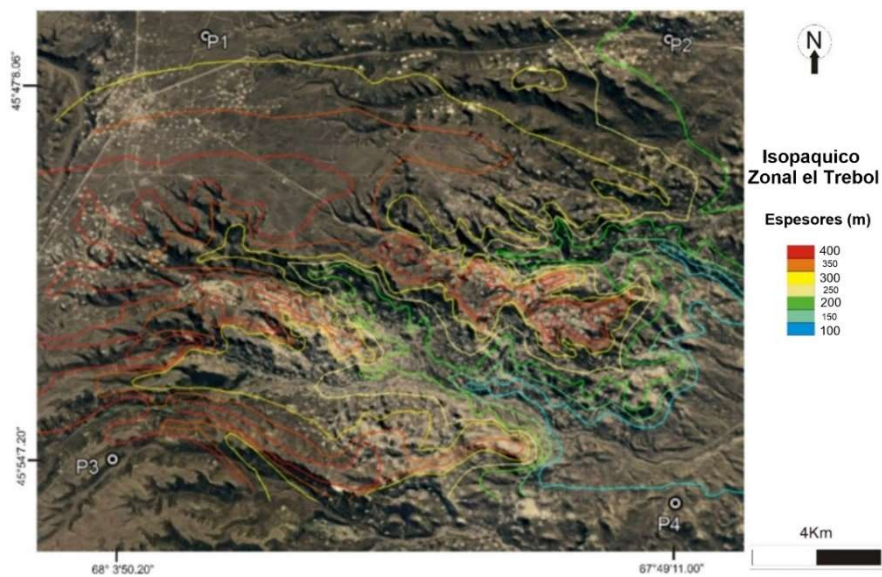


Figura 7. Plano de espesores del Acuífero Patagoniano en la zona El Trébol.

La distribución de espesores es coincidente con la geomorfología actual. Los mayores espesores (400 metros), se encuentran en los sectores de borde de la pampa, más hacia el Suroeste. En el área de Manantiales Behr por su parte (Figura 8), los espesores de los

niveles arenosos del Acuífero Multiunitario Superior abarcan entre los 200 y los 400 metros de potencia principalmente en los bordes de la pampa, como se aprecia en el Plano de la Figura 8. En dicho plano es dable observar la presencia de los mayores espesores en el sector correspondiente al Suroeste del Plano con espesores de hasta 420 metros. Los mayores espesores alcanzan los 425 metros y se corresponden con los sectores Suroeste del yacimiento, en la zona del denominado Lote 37. Por el contrario, estos espesores disminuyen a menos de 100 metros de espesor en el extremo Noroccidental del Yacimiento, hasta desaparecer y asimismo hacia el sector costero donde rápidamente se adelgazan acompañando el relieve topográfico.

El plano Isopotenciométrico del área El Trébol (Figura 9), presenta morfología radial con una dirección de flujo Noroeste-Sudeste desde la zona de recarga sobre la Pampa del Castillo hacia el Océano Atlántico, y coincidente con el relieve de la región. La descarga del flujo local se dispone principalmente en los cañadones donde se produce la convergencia del escurrimiento El plano isopotenciométrico de la zona de Manantiales Behr presenta un similar comportamiento radial con dirección de flujo del Noroeste hacia el Sudeste y descarga de aguas sobre el eje de los cañadones principales constituyendo zonas de vaguadas. La zona de recarga, se ubica inmediatamente al Oeste, sobre la Pampa del Castillo.

Estas zonas de recarga sobre la Pampa del Castillo, donde mayormente la infiltración procedía de la precipitación nival, en la actualidad presenta una disminución de las grandes nevadas que ocurrían antiguamente siendo mayormente precipitaciones pluviales. Investigaciones en yacimientos petroleros de El Trébol han evidenciado que los manantiales en la parte media de los cañadones están levemente enriquecidos isotópicamente, sugiriendo un proceso de evaporación o recarga por precipitaciones nivales (Ostera *et al.*, 2009).

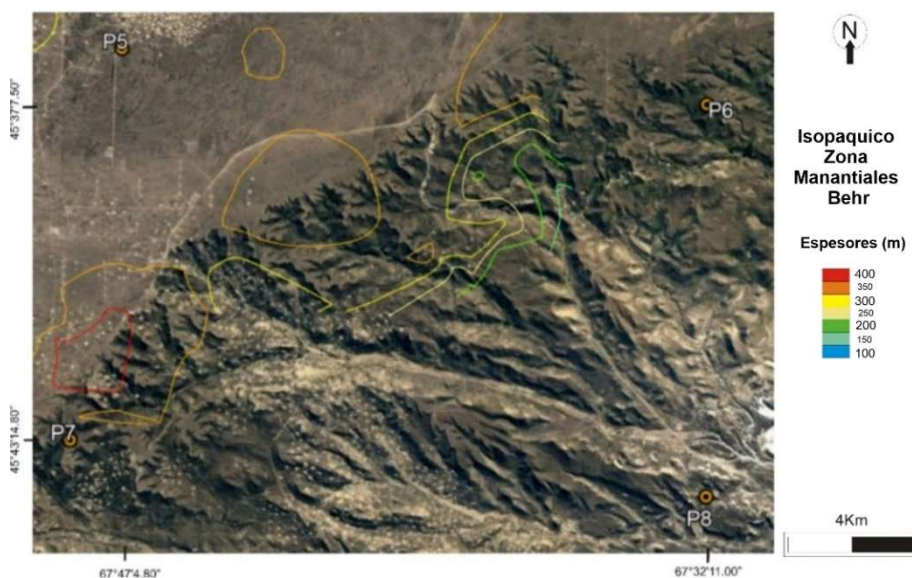


Figura 8. Plano de espesores del Acuífero Patagoniano en el área Manantiales Behr.

Muestras analizadas en el Laboratorio de Física Ambiental de la Universidad de Heidelberg (Alemania), han aportado datos de edad Carbono 14 que muestran aguas antiguas. Una muestra correspondiente al pozo PC3 (zona de recarga Pampa del Castillo, colectada a 350 metros de profundidad), arrojó una edad de 12.800 años A.P., mientras que la muestra perteneciente al pozo E9A, ubicado en las cabeceras del Cañadón El Trébol registró una edad de 12.800 años A.P. Estos valores denotan el prolongado tiempo de

tránsito que las aguas tienen dentro del sistema (más de 12.200 años) (Grizinik y Sonntag, 1994).

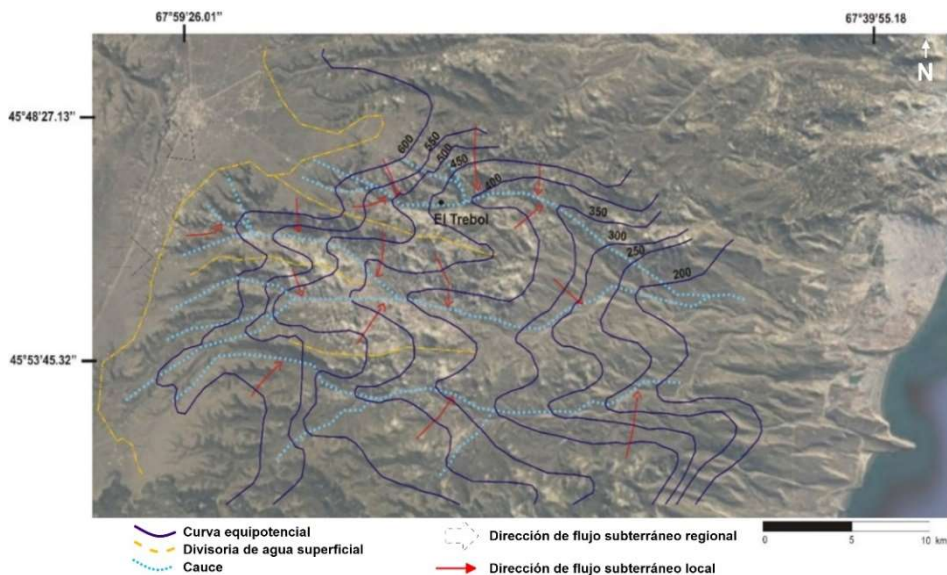


Figura 9. Mapa de Isopiezas del Área El Trébol. Tomado de Grizinik *et al.* (2021).

La proyección de modelos hidroclimáticos registran 12% menos de lluvias y más de 30% de aumento de Evapotranspiración en los próximos 60 años. En los últimos años las precipitaciones han sido deficitarias. Además, a las tendencias negativas de precipitación en el Norte de la Patagonia (Cuenca del río Chubut), se observa un aumento de la temperatura y una disminución del caudal desde 1960 a la actualidad. Estas tendencias continuarán en el futuro en el contexto de cambio climático (Pessacq *et al.*, 2020).

La tendencia de precipitaciones para la cuenca de Sarmiento y la Estación Los Molinos ubicadas al Sudoeste, distante a 150 Km de esta región, es fuertemente negativa para los últimos 20 años. Esto también muestra una disminución en el volumen almacenado en el lago Musters (reservorio del cual se alimenta el acueducto a Comodoro Rivadavia), de 380 hm³ /año (HCA Consultora SRL, 2021).

Las mediciones observadas en perforaciones en distintos períodos muestran una disminución de los niveles estáticos, que en algunos casos representan decenas de metros. Esto puede ser visualizado en la Tabla 3 y la Figura 9, donde los pozos de la zona de Manantiales Behr, nos muestran descensos continuos desde 1950 a la actualidad.

Tabla 3. Profundidades de los niveles estáticos en el tiempo del área Manantiales Behr.

Pozo Unidad	Año 1950 m	Año 1967 m	Año 1985 m	Año 2018 m
P30	26	-	-	40,1
P39	5,2	32	-	37,2
P43	13	-	-	78,5
P49	15	38	-	41,2
P50	22	96	91	98
P52	20	68	67	75,7
P53	17	44	59	65,5
P57	36	95	-	100
P58	25	40	-	52
P60	20	26	-	38
P61	28	95	90	98
P64	-	38	34	46
P74	-	-	25	71,2

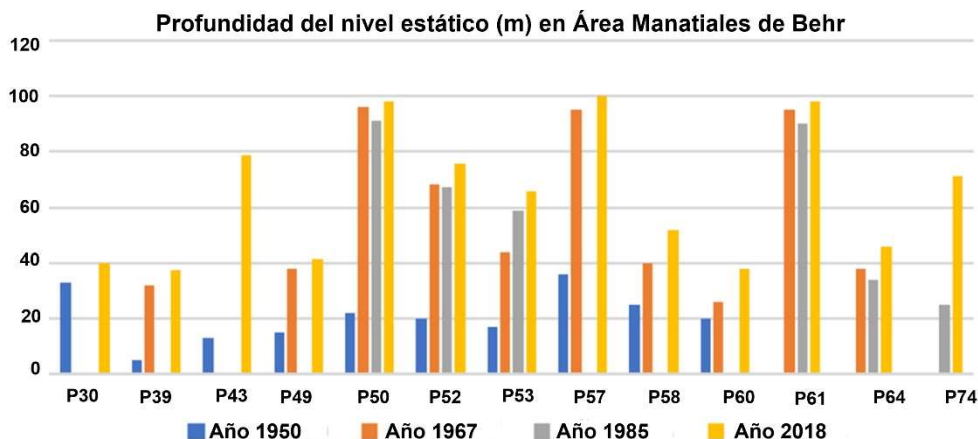


Figura 10. Representación de los niveles estáticos en el área Manantiales Behr.

También es dable observar el mismo comportamiento en el otro sector de explotación, la zona de El Trébol (Tabla 3), donde también se distingue, una disminución de las profundidades de los niveles estáticos en los pozos allí ubicados (Figura 11).

Tabla 3. Profundidad de los niveles estáticos en el tiempo en el área El Trébol

Pozo	Año 1974	Año 1989	Año 1999	Año 2012
Unidad	m	m	m	m
ET9	49	55	60	89
ET10	-	57	-	76
ET21	86	104	117	-
ET22	46	60	75	98
ET23	-	83	-	96
ET25	-	55	78	87

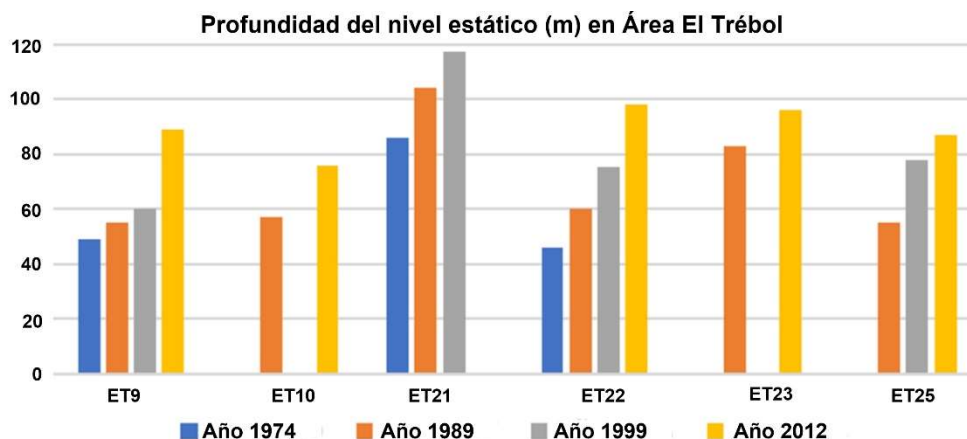


Figura 11. Representación de los niveles estáticos en el área El Trébol.

A una distancia de aproximadamente 100 km más al Sur, en la zona de Meseta Espinosa, dentro del Golfo San Jorge, pero en la provincia de Santa Cruz, las perforaciones de agua que abastecen parcialmente a la ciudad de Caleta Olivia (Batería Meseta Espinosa I y II), también han experimentado descensos de los niveles estáticos del alrededor de 38 metros para un lapso de 32 años en la mayoría de dichos pozos (Grant, 2018).

Esta disminución de niveles también ha provocado el agotamiento de manantiales y la desaparición de mallines (manantiales difusos), que antiguamente conformaban extensos humedales en el fondo de cañadones. Estos procesos conllevan a la ocurrencia de fenómenos de erosión marcados, con el consiguiente deterioro de dichas zonas (Figura 12).



Figura 12. Área en degradación por descenso de los niveles freáticos, con avances de erosión del fondo del cañadón, donde antiguamente existía un mallín muy desarrollado.

A medida que el agua se desplaza por el medio poroso se producen procesos de incorporación de iones en el agua de las rocas a través de las que va circulando, así como otros procesos como reemplazo iónico. De esta manera, para el área de estudio, se produce una evolución de las aguas que van desde Bicarbonatadas sódicas, pasando por aguas del tipo sulfatadas sódicas, magnésicas, llegando a una composición del tipo Clorurada sódica y un aumento de la cantidad de sólidos totales disueltos, en un grado de evolución mayor, al circular en los términos inferiores de la formación Patagonia y mucho más hacia el Este.

Como puede observarse en las figuras 12 y 13, donde consta el ploteo en el diagrama de Piper de las muestras tomadas en 2003, en el Yacimiento El Trébol, y en 2011 en el yacimiento Manantiales Behr (tomadas como ejemplo promedio), el tipo de aguas predominantes en las zonas de estudio son las Bicarbonatadas Sódicas.

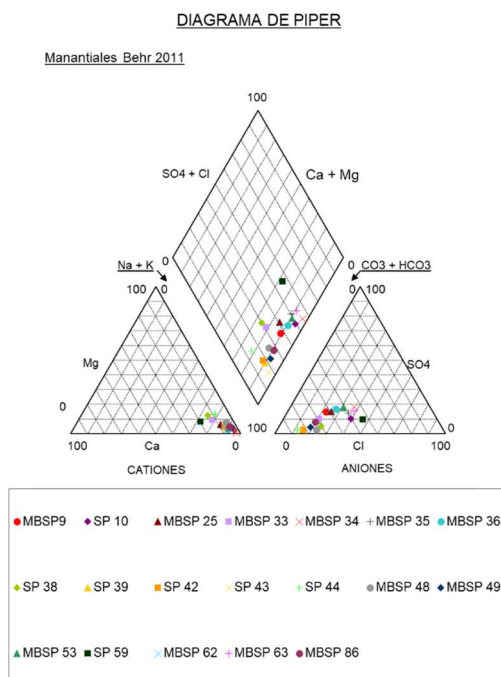


Figura 12. Componentes mayoritarios en Manantiales de Behr

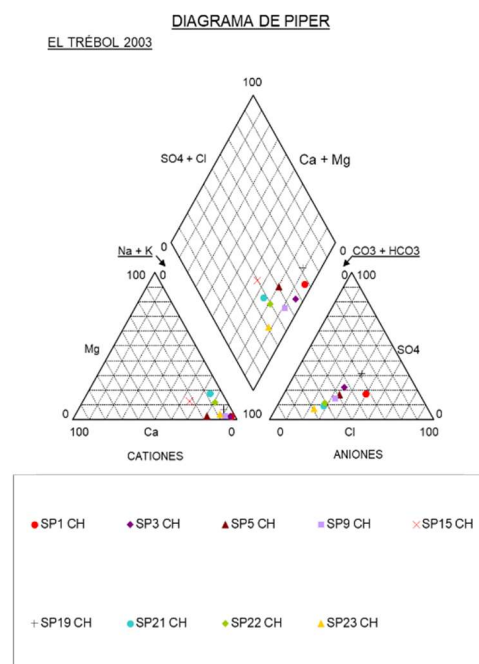


Figura 13. Componentes mayoritarios en Manantiales El Trebol

En cuanto a la salinidad, expresada en miligramos por litro de sólidos totales disueltos, los valores para todas las muestras analizadas en Manantiales Behr, oscilan entre los 250 mg/L y 419 mg/L. En el caso de las muestras correspondientes al Yacimiento El Trébol, en 2003, los valores de salinidad oscilan entre los 178 y 630 mg/l.

A lo largo del tiempo, para las muestras analizadas en El Trébol y Manantiales Behr, prácticamente no se observan variaciones, tanto en su salinidad, como en su composición. Es destacable la buena calidad del agua en cuanto a sus componentes mayoritarios, así como la poca variación en el tiempo durante el período analizado. Por ejemplo, muestras colectadas en el pozo MBSP53, muestra salinidades de 354, 302 y 322 mg/L para los años 1986, 2005 y 2011 respectivamente.

CONCLUSIONES

La región de la cuenca del Golfo San Jorge corresponde a una zona de clima árido, con precipitaciones de alrededor de 230 mm/año que van disminuyendo hacia el Oeste, y con un déficit hídrico anual de 500 mm.

Numerosos investigadores han estimado para la región una infiltración anual de alrededor de 20 mm, que ocurre principalmente en la temporada invernal, donde la precipitación nival era la más importante.

En profundidad, las reservas hídricas subterráneas, están constituidas por aguas antiguas, habiéndose medido mediante el Método de datación con Carbono¹⁴, edades de 12.300 a 12.800 años A.P.

Las profundidades de los niveles estáticos en las áreas de El Trébol y Manantiales Behr, muestran un descenso sostenido desde los primeros pozos perforados en la mitad del siglo pasado que llegan a 50 metros de variación, e inclusive en áreas cercanas en la provincia de Santa Cruz, con -38 metros en promedio a lo largo de 32 años.

La incorporación de nuevas perforaciones para abastecimiento, deben contar con estudios adecuados a la vulnerabilidad del recurso, a fin de realizar una explotación sostenible, dado la debilidad del sistema en el tiempo.

Se resalta la importancia de incorporar una estación nivométrica en la zona de Pampa del Castillo, a fin de contar con datos fehacientes de registros de precipitación nival, responsable de los mayores aportes de infiltración al sistema.

Se estima necesario, la realización de un detallado balance hídrico del Acuífero Multiunitario en la zona, ya que con las proyecciones que presenta el cambio climático, los procesos de desertificación y el aumento de población y sus demandas, será conveniente conocer cuanto antes, el grado de minería del agua subterránea que estamos realizando con el recurso hídrico del subsuelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Auge, M. (2007).** Estudio Hidrogeológico de acuíferos Superiores. Almacenamiento Subterráneo de gas natural Diadema. Comodoro Rivadavia. Chubut. Inf. Inéd.
- Castrillo, E. Griznik, M. y Amoroso, A. (1982).** Geohidrología del sector Sureste de la provincia de Chubut, Argentina. Cátedra de Hidrogeología. UNPSJB.
- Castrillo, E. Griznik, M. y Amoroso, A. (1984a).** Contribución al Conocimiento Hidrogeológico de los alrededores de Comodoro Rivadavia, Chubut. Argentina. IX Congreso Geológico Argentino. Actas VI, 393-406. Bariloche.

- Castrillo, E. Griznik, M. y Amoroso, A. (1984b).** Exploración y evaluación de las aguas subterráneas en la zona de Pampa del Castillo entre Cañadón El Trébol y el paralelo de 46°. Chubut. Cátedra de Hidrogeología, Universidad Nacional de la Patagonia SJB.
- Custodio, E. (2015).** Aspectos hidrológicos, ambientales, sociales y éticos del consumo de reservas de agua subterránea en España: minería del agua subterránea en España. E. Custodio (Ed.). UPC and SUEZ. Advanced Solutions (AQUALOGY) – Cetaqua, Barcelona. pp 1-490.
- Chachero, M.J. (2014).** Análisis de precipitaciones máximas en Comodoro Rivadavia. Revista CUADERNOS del CURIHAM, 20 1-10.
- Grant, R. (2018).** Operación y desarrollo de pozos de agua en Meseta Espinosa, Santa Cruz. Inf. Inédito. Sinopec Argentina.
- Griznik, M y Sonntag, C. (1994).** Sobre algunas edades de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Multiunitario del Sudeste de la provincia del Chubut, Argentina. Revista Naturalia Patagónica. Ciencias de la Tierra.2: 1-12.
- Griznik, M., Correia, P., Farías, L. y Acosta, A. (2021).** Análisis y evaluación de alternativas para un aprovechamiento integral de los acuíferos en las áreas El Trébol y Manantiales Behr, a fin de incrementar el caudal de abastecimiento de agua a la ciudad de Comodoro Rivadavia. Inf. Inédito. MCR.
- Griznik, M. y Stampone, J. (2022).** Recursos hídricos subterráneos de la provincia del Chubut. XXI Congreso Geológico Argentino. Relatorio. Geología y Recursos Naturales de la provincia del Chubut. Puerto Madryn. pp 1603-1620.
- HCA Consultora SRL. (2021).** Estudio del Impacto Ambiental del proyecto de la presa del Nacimiento del río Senguer, Chubut. Inf. Inédito. Rawson.
- Levin, M., Panarello, H., Albero, M., Castrillo, E., Griznik, M. y Amoroso, A. (1987).** Grounwater Recharge and Subsurface Flow in the Comodoro Rivadavia Area. Chubut Province, Argentina. Isotopic and Hydrochemical study. In Estimation of Natural Grounwater Recharge. Pp 377-393. Antalya. Turquia.
- Levin, M., Albero, M., Panarello, H., Ospital, C. (1987).** Uso de isótopos ambientales (^{18}O , ^2H y ^3H) en estudios hidrogeológicos de la zona de Manantiales Behr. INGEIS. Inf. Inéd.
- Ostera, H., Torres Vilar, C. y Fasola M. (2009).** Determinación del origen de las aguas subterráneas de algunas áreas de explotación de las provincias de Chubut y Santa Cruz. CTA. Dirección de Tecnología Argentina. UNAS. Repsol Ypf. Inf. Inéd.
- Pessacq, N., Flaherty, S., Solman, S., Pascual, M. (2020).** Climate change in Northern Patagonia. Critical decrease in Water Resources. Springer Wien, Theor & Application Climatology. 140, 3—4, 2-2020, 807-822.
- Salvioli, G., Zambrano, J., Mercado, Victoria, J., Guimaraes, R.E.; Nally, J. (1987).** Estudio hidrogeológico del acuífero explotado en Manantiales Behr. Comodoro Rivadavia. Inf. Inéd. CRAS. San Juan.
- Sciutto, J. (2000).** Hoja Geológica 4566-III. Comodoro Rivadavia. 1:250.000. Segemar. Bol. 244: 1-53. Buenos Aires.
- Simeoni, A. (1986).** Estudio hidrogeológico de Manantiales Behr, Comodoro Rivadavia, provincia del Chubut. Dirección Gral. de Estudios y Proyectos, Ministerio de Economía, Servicios y Obras Públicas de la provincia del Chubut. Inf. Inéd. Rawson.

Trabajo recibido el 1/06/2022 y aprobado para su publicación el 16/06/2022.

Cómo citar este artículo

Griznik, M. y Correia, P. (2022). Análisis hidrogeológico del Acuífero Multiunitario Superior y su relación con la explotación intensiva de agua, Chubut. Argentina, *Revista Argentina de Hidrogeología*, 1:31-46

EL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO Y SU EXPLOTACIÓN EN LA REGIÓN DE BAHÍA BLANCA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

GROUNDWATER RESOURCE AND ITS EXPLOITATION IN THE REGION OF BAHÍA BLANCA, PROVINCE OF BUENOS AIRES, ARGENTINA

René Albouy^{1}, Nerea Bastianelli², Andrés Ruffo³, Lucía Carrica²,
Juan Manuel Giorgi³ y Matías Rey³*

¹UNS – Departamento de Geología – INGEOSUR- San Juan 670 Bahía Blanca

²UNS – Departamento de Geología - CGAMA

³UNS – Departamento de Geología - CONICET

*Autor de correspondencia: albouy@uns.edu.ar

RESUMEN

El estudio y evaluación del recurso hídrico subterráneo es fundamental para su gestión, uso y conservación. En base a estudios previos e investigaciones en desarrollo que se llevan a cabo en el Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur, este trabajo busca sintetizar y presentar el estado actual del conocimiento del agua subterránea, en la porción suroccidental de la provincia de Buenos Aires, que abarca total o parcialmente los distritos de Bahía Blanca, Tornquist, Coronel Rosales, Coronel Dorrego, Coronel Pringles, Monte Hermoso y Villarino. En toda el área del trabajo queda demostrada la disponibilidad y relevancia que adquiere la explotación y utilización del agua subterránea para satisfacer todas las necesidades de suministro. La investigación y estudios de detalle del recurso representan un elemento científico básico e indispensable en el marco de una explotación racional y sustentable en términos de cantidad y calidad.

Palabras clave:

Hidrogeología - Recursos hídricos subterráneos - Suroeste bonaerense

ABSTRACT

The study and evaluation of groundwater resources is fundamental for their management, use and conservation. Based on previous studies and ongoing research carried out at the Geology Department of the Universidad Nacional del Sur, this paper aims to synthesize and expose the current state of knowledge of groundwater in the southwestern portion of the province of Buenos Aires, which includes all or part of the districts of Bahía Blanca, Tornquist, Coronel Rosales, Coronel Dorrego, Coronel Pringles, Monte Hermoso and Villarino. The availability and relevance of the exploitation and use of groundwater to satisfy all supply needs is demonstrated throughout the study area. Research and detailed studies of the resource represent a basic and indispensable scientific element in the framework of a rational and sustainable exploitation in terms of quantity and quality.

Keywords:

Hydrogeology - Groundwater resources - Southwest Buenos Aires

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se reseña el estado actual del conocimiento del agua subterránea en la porción suroccidental de la provincia de Buenos Aires. La descripción y síntesis de las características hidrolíticas de las unidades acuíferas está fundamentada en estudios previos referenciados en el texto e investigaciones en desarrollo que se llevan a cabo en el

Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. El panorama hidrogeológico que se presenta es representativo y característico de una amplia región que abarca total o parcialmente los distritos de Bahía Blanca, Tornquist, Coronel Rosales, Coronel Dorrego, Coronel Pringles, Monte Hermoso y Villarino. En particular se consideran los acuíferos que se reconocen en el subsuelo del partido de Bahía Blanca, en el área serrana e interserrana de la vertiente suroccidental de las Sierras Australes, hasta el estuario de Bahía Blanca y en las dunas de la costa atlántica y partido de Villarino. La ciudad de Bahía Blanca es el núcleo urbano más importante de la región y cabecera del partido homónimo que incluye a las localidades de Ingeniero White, General Daniel Cerri y Cabildo. El área del estudio (Figura 1) cubre una superficie de unos 30.000 Km².

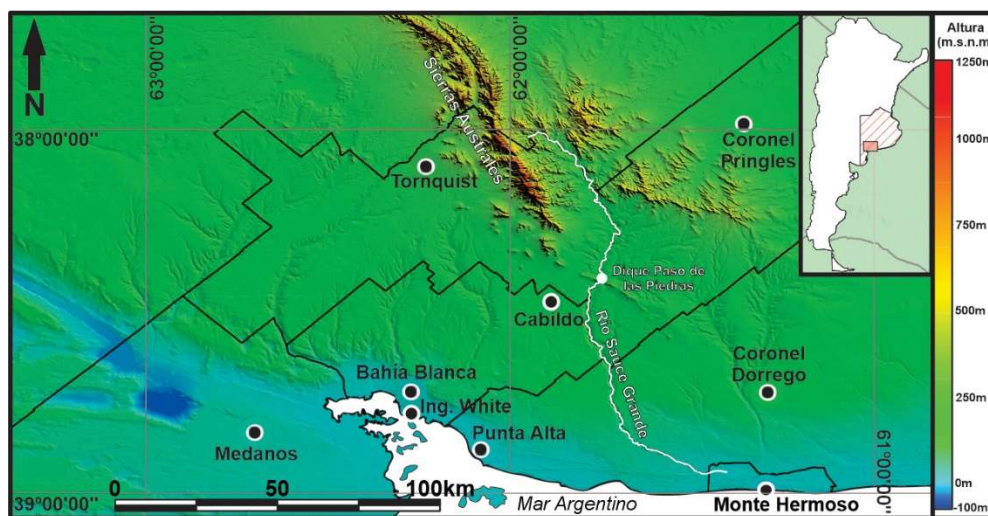


Figura 1: Área de estudio.

Según el INDEC (2010) concentra una población total de unos 445.792 habitantes, distribuida, principalmente, en los partidos de Bahía Blanca (301.572 habitantes) y Coronel Rosales (62.152 habitantes). En general, el recurso hídrico subterráneo constituye la principal fuente de abastecimiento a ciudades, pueblos y áreas rurales de la zona.

El clima de la región es de transición entre el templado subhúmedo, que categoriza a la llanura bonaerense y el árido o de “estepa”, dominante en la Patagonia (Carrica, 1998). Según la clasificación de Thornthwaite (1948) es de tipo subhúmedo-húmedo, mesotermal, con nula o escasa deficiencia de agua y una evapotranspiración anual concentrada en el período estival (Bonorino *et al.*, 1997). La temperatura anual promedio los 14,7 °C; el mes más caluroso es enero con 23 °C y el más frío julio con 7 °C. Según datos propios, los módulos pluviométricos van desde los 642 mm/año (Bahía Blanca, SMN, 1956-2019) y 766 mm (Tres Arroyos, INTA Barrow, período 1960-2013). El sudoeste bonaerense representa el extremo sur de la amplia llanura pampeana argentina, marcado por la interfaz entre el continente y el mar y se ubica en una zona clasificada como de climas templados con variaciones estacionales marcadas (Campo de Ferreras *et al.*, 2004).

De acuerdo a la sistematización hidrogeológica propuesta por González (2012) el área del trabajo integra parte de las regiones Serrana, Interserrana-Periserrana y Cuenca de Bahía Blanca y Auge *et al.* (2006) la incluye en la unidad Llanura Chaco Pampeana árida, donde predominan los denominados genéricamente “sedimentos pampeanos” (Fidalgo *et al.*, 1975) y las formaciones medanosas. En la región, la principal fuente de abastecimiento a las localidades de Bahía Blanca, Ingeniero White y Punta Alta proviene desde el dique Paso de las Piedras, ubicado a unos 50 Km al noreste de la ciudad, en la cuenca superior

del río Sauce Grande. El aprovisionamiento se suplementa con la explotación del agua subterránea en un área de llanura próxima al piedemonte de las Sierras Australes, en proximidades de la localidad de Cabildo. En las ciudades de Médanos, Monte Hermoso, Tornquist, Coronel Dorrego y Coronel Pringles así como en las extensas zonas rurales, el recurso hídrico subterráneo constituye la única fuente de abastecimiento. En este contexto, el estudio y conocimiento del agua subterránea es imprescindible como medio de gestión tendiente a la protección en cantidad y calidad de un recurso natural estratégico para el desarrollo social y económico del lugar.

RESULTADOS

Esquema hidrogeológico del área

En la descripción de las principales características hidrolíticas de las unidades identificadas en la región, se sigue el esquema propuesto por la DYMAS (1974) y Bonorino (1988 y 2005) (Tabla 1). El Basamento Hidrogeológico regional está integrado por rocas cristalinas del precámbrico y rocas paleozoicas, principalmente cuarcitas y esquistos, aflorantes en las Sierras Australes (Bonorino *et al.*, 1997). En el subsuelo del área se han detectado a profundidades variables, producto de un fracturamiento en bloque, que van desde los 1.700 m en inmediaciones de la ciudad de Bahía Blanca (Bonorino, 1988) hasta 420 m en el bajo San José, en la cuenca media del río Sauce Grande, en el ambiente periserrano. Se trata de rocas primariamente acuífugas que poseen permeabilidad secundaria baja por fracturas y diaclasamiento (Albouy, 1994).

Tabla 1. Esquema hidroestratigráfico del área de estudio. Modificado de Bonorino (2005).

Unidad Geológica	Litología	Sección hidroestratigráfica	Comportamiento hidrolítico
Médanos	Arenas eólicas	Epiparaniana	Zona no-saturada / acuífero (freático)
Pampeano	Limos loessoides		Acuífero (freático)
Fm. Chasicó	Arcillas y areniscas yesíferas Arenas finas		Acuitardo Acuífero (semiconfinado)
Fm. Barranca Final	Arcillas marinas con intercalaciones de arenas	Paraniana	Acuícludo Acuíferos subordinados
Fm. Ombucta	Arcillas, arcillas arenosas Arenas, arenas gruesas		Acuícludo Acuífero (confinado)
Fm. Pedro Luro	Arcilitas, limolitas, arenas Arcilitas, limolitas		Acuífero (confinado) Acuícludo
Fm. Colorado	Arenas gruesas, conglomerádicas (sup.) Areniscas (inf.)		Acuífero (confinado) Acuífugo
Basamento hidrogeológico (Fm. Fortín + rocas paleozoicas)	Areniscas Areniscas cuarcíticas, cuarcitas, granitos	Basamento impermeable	Acuífugo

La Sección Hipoparaniana incluye un potente paquete sedimentario de unos 1.500 m de espesor, con formaciones que van desde el Cretácico Superior al Oligoceno, que se identifican a más de 450 m de profundidad (Bonorino, 1988). De esta Sección interesa mencionar las sedimentitas de las Formaciones Colorado y Ombucta por ser portadoras de los niveles acuíferos del Sistema Hidrotermal Profundo (SHP) de Bahía Blanca. La Sección Paraniana, está representada por las pelitas verdosas del Mioceno, de origen marino, de la Formación Barranca Final (Bonorino, 1988). Se trata de un medio predominantemente acuícludo, con aguas de alta salinidad y espesores de entre 200 y 300 metros que se acuñan

hacia las Sierras Australes. Las Secciones Hipoparaniana y Paraniense no han sido identificadas en los lugares aledaños a las sierras. La Sección Epiparaniana está constituida en la base por los limos areno-arcillosos de la Formación Chasicó, de extensión regional y unos 15 m de espesor medio, que alojan un acuífero surgente-semisurgente con aguas salobres (Carrica *et al.*, 2020). Hacia arriba y en posición aflorante o subaflorante se identifican los denominados genéricamente “sedimentos pampeanos” (Fidalgo *et al.*, 1975) compuestos por arenas finas y limos arenosos cementados por carbonato de calcio, portadores del acuífero libre regional. Se han reconocido espesores máximos de hasta 200 m en los que son frecuentes una alternancia de niveles acuíferos-acuitardos portadores de agua dulce a salobre con contenidos variables de fluoruros y/o arsénico (Carrica *et al.*, 1992; Bonorino *et al.*, 1997; Bonorino *et al.*, 2001; Albouy *et al.*, 2012; Ruffo *et al.*, 2021a; Albouy *et al.*, 2020; Carrica *et al.*, 2020). Sobreimpuestos a estos sedimentos y en el sector costero del sudoeste bonaerense se reconoce un cordón medanoso de dunas móviles o activas, semifijas por vegetación y fijas. Se trata de un relicto arenoso generado por la acción del mar sobre los sedimentos pampeanos y expuestos posteriormente a la acción del viento (Auge, 2004). Dicha cadena contiene un acuífero libre que constituye un excelente reservorio de agua dulce del cual se abastecen los núcleos urbanos del sector (Ruffo *et al.*, 2021a). En el sector septentrional del partido de Villarino, en los alrededores de las localidades de Médanos y La Mascota, se desarrolla un cordón medanoso psamítico y eólico reconocido, entre otros como Formación Médanos (Bonorino, 1974) que aloja un acuífero libre con agua dulce apta para consumo humano. En los párrafos que siguen, se exponen los rasgos geológicos e hidrogeológicos que caracterizan las unidades acuíferas anteriormente mencionadas.

Los acuíferos en el subsuelo de la ciudad de Bahía Blanca

El SHP tiene una extensión continental de unos 2.800 Km² (Bonorino, 1988). Se trata de un complejo arenoso (formaciones Ombucta y Colorado) de poco más de 380 m de espesor dividido por una cuña de sedimentos marinos e intercalado en una serie sedimentaria normal, que constituye la cobertura de un basamento fracturado en bloques (Auge *et al.*, 2006). Las propiedades más relevantes del SHP son: la profundidad de yacencia, situada entre los 500 y 1.300 m; el caudal de surgencia, variable entre 50 y 100 m³/h; la presión en boca de pozo, de hasta 20 atmósferas; la calidad de sus aguas, en su mayoría aptas para todo uso; y su termalismo, con temperaturas desde 50 hasta 74 °C. por lo que se lo clasifica en un sistema hidrotermal de baja entalpía (Bonorino, 2005).

Las investigaciones realizadas identifican la zona de alimentación o recarga del sistema, por infiltración de los excedentes de la lluvia, en el área pedemontana occidental de las Sierras Australes, lo que conlleva una conexión hidráulica del acuífero freático libre con los flujos intermedio y profundo (Carrica *et al.*, 2020). El valor total de la recarga en el piedemonte se cifra entre un 12% y un 15% de la precipitación, de los cuales entre un 3% y 5% alimentarían al flujo profundo. Hasta el momento no existen ensayos de bombeo sistematizados en el acuífero, que permitan una estimación de los parámetros hidráulicos y de sus recursos y reservas.

El SHP ha sido alumbrado por más de 70 perforaciones, 50 de las cuales están emplazadas en el distrito de Bahía Blanca (Carrica *et al.*, 2020). La productividad de los pozos ha decaído notablemente en el tiempo debido a la antigüedad de los mismos y deterioro de las cañerías. Hasta el final de la década de 1960, la ciudad de Bahía Blanca se abastecía principalmente con el agua proveniente de más de 25 perforaciones del SHP, hoy reemplazadas casi totalmente por el Embalse Paso de las Piedras. Actualmente, los usos más significativos son: agua para industrias de alimentos, balneoterapia y calefacción (Carrica *et al.*, 2020).

El acuífero “intermedio” alojado en la Sección Epiparaniana inferior (Fm. Chasicó) se ubica a profundidades entre 180 y 230 m; según la topografía los pozos son surgentes o semisurgentes. La surgencia natural, cuando existe, no supera los 3 m³/h (Carrica et al., 2020). El acuífero se lo explota en forma incontrolada desde hace más de un siglo mediante un centenar de pozos, muchos de los cuales resultan difíciles de ubicar dado el paso del tiempo y su deterioro. Si bien el agua es inapta para consumo humano por su salinidad, se la usa en procesos industriales, uso recreativo y pecuario. Cuando es posible, reemplaza al agua potable de red, produciendo un importante ahorro de la misma. Se trata de aguas salobres cloruradas sulfatadas sódicas, que surgen entre 26 y 33 °C, con conductividades eléctricas entre 2.400 y 6.200 µS/cm, dependiendo de la profundidad, ubicación geográfica y características constructivas del pozo, mezclas de agua de otros niveles, a las que se agregan las variaciones hidrogeoquímicas naturales. Resulta interesante las bajas concentraciones de elementos menores y trazas tóxicos de las aguas y la ausencia de contaminación, lo cual permite su potencial utilización para otras actividades previo tratamiento mediante técnicas hidroquímicas como desalinización, ablandamiento, etc. .

El acuífero libre o freático en el ejido urbano de la ciudad se alumbra entre los 2,5 a 50 m de profundidad, según la altura topográfica del terreno. El agua de la capa freática esta naturalmente salinizada y, muchas veces, contaminada por vertidos de pozos ciegos, perdidas del sistema de saneamiento (cloacas) y a veces con combustible proveniente de roturas de tanques subterráneos de estaciones de servicio (Carrica *et al.*, 2020). En ciertos sectores de la ciudad este nivel es explotado mediante perforaciones domiciliarias poco profundas (entre 15 y 50 m) para riego de parques y jardines con especies vegetales tolerantes a las sales y llenado de piletas de natación y lavadero de automóviles. También algunas empresas (PYMES) suelen utilizar estas aguas para uso industrial, previo análisis químico. La Municipalidad de Bahía Blanca explota este nivel para riego de plazas y parques mediante pozos someros (15 a 30 metros). Esta actividad, convenientemente regulada debe propiciarse, a los efectos de reemplazar para estos usos, al agua potable de la red domiciliaria. Cabe mencionar que en el área costera, los sedimentos pampeanos del acuífero freático se hallan cubiertos por una secuencia, de hasta 15-20 metros de espesor, de sedimentos marinos de albuferas y playa de la Formación Maldonado de edad Pleistoceno superior-Holoceno, (Fidalgo, 1983), que alojan a unos niveles acuíferos-acuitardos con aguas salmueras del tipo cloruradas sódicas de hasta 70 g/l de Sólidos Disueltos Totales, inaptas para todo tipo de uso. El nivel freático se encuentra aflorando o a escasa profundidad. Las restantes formaciones que completan el esquema hidroestratigráfico son de distribución escasa y saltuaria y, por lo tanto, hidrogeológicamente poco significativas.

El agua subterránea en el piedemonte serrano y llanura interserrana

Entre los estudios referidos a las condiciones hidrogeológicas e hidroquímicas del agua subterránea dominantes en el sector de la vertiente suroccidental de las Sierras Australes bonaerenses y llanura interserrana, se citan los aportes de Albouy (1994), Albouy *et al.* (2010, 2011, 2012 y 2013), Bonorino *et al.* (1990, 1997), Carrica (1998), Carrica *et al.* (1992, 2017). La contribución de Bonorino *et al.* (1997) sintetiza una evaluación hidrológica e hidrogeológica de los recursos hídricos disponibles en las cuencas del río Sauce Chico y A° Napostá Grande, enfocada a satisfacer la demanda para consumo humano a Bahía Blanca y Gran Bahía Blanca.

La hidrodinámica subterránea reconoce un esquema de circulación regional con una zona preferencial de recarga (el pedemonte serrano), una de circulación (la llanura) y el área de descarga final (litoral marítimo). El mapa de isopiezas (Figura 2) señala, en las nacientes y cabeceras de los cursos, un sentido predominante de flujo subterráneo noreste-suroeste, perpendicular a la dirección del cordón serrano de la Ventana. El tipo de manto acuífero

dominante es radial, divergente en los interfluvios y convergente hacia los cursos. En el área pedemontana evidencian una tendencia general a la influencia y al ingresar a la llanura cambian su carácter a efluentes y constituyen el nivel de base o descarga del flujo subterráneo local (Albouy, 1994; Carrica, 1998). Los cursos de agua tienen sus nacientes en los valles de vertiente serranos, labrados sobre las rocas paleozoicas acuífugas y es común que pierdan definición por infiltración en el piedemonte, ámbito que constituye la principal zona de recarga regional. El estudio del acuífero freático, permitió identificar áreas con aguas subterráneas de buena calidad factibles de ser explotadas para todo uso. El acuífero libre se aloja en los materiales limo arenosos y limo arcillosos correspondientes a los “sedimentos pampeanos” (Fidalgo et al., 1975). Estos registran espesores de hasta 200 m en la llanura periserrana y se acuñan hacia los afloramientos. En el pie de sierra y área intermontana, el acuífero está alojado también en rellenos modernos del Plioceno y Cuaternario constituido por depósitos de origen fluvial, coluvial y eólico, de espesor y distribución areal restringida y muy permeables (Albouy y Bonorino, 1997).

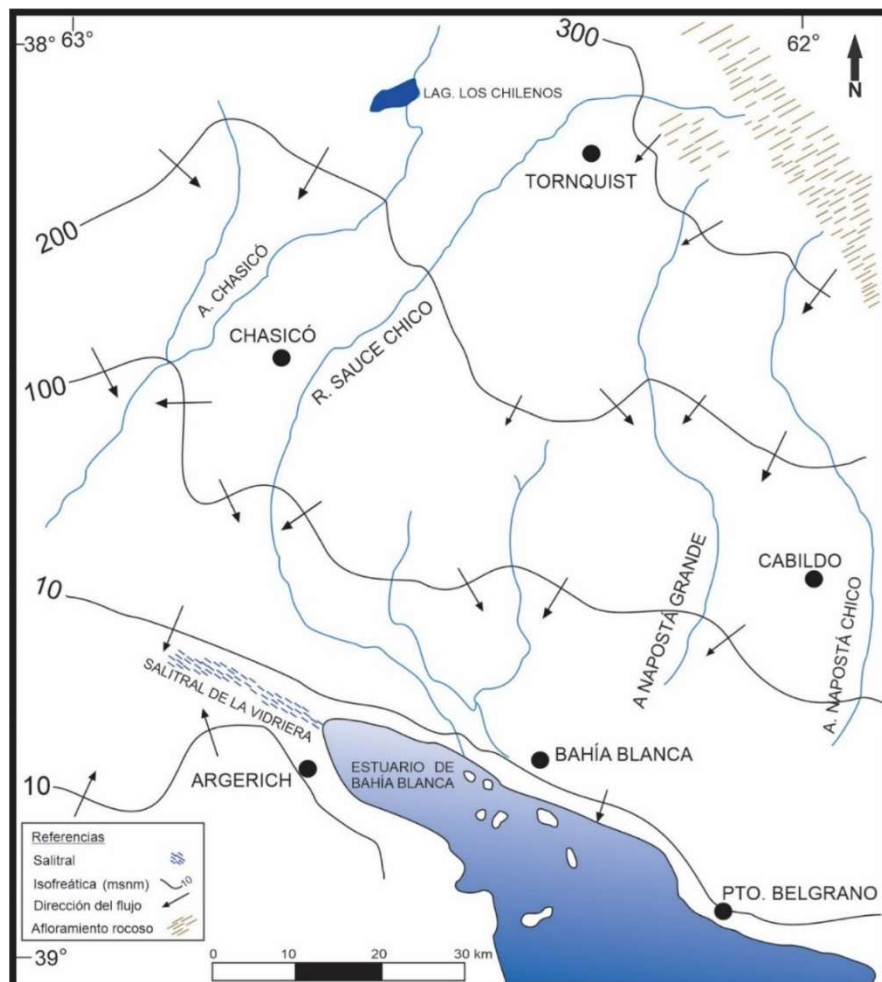


Figura 2: Mapa de isopiezas del área de estudio.

Los sedimentos pampeanos, por sus características hidrolíticas, presentan anisotropías locales que dan lugar a una alternancia de niveles acuíferos y acuitardos (sistema multicapa) que se comporta a gran escala como un sistema homogéneo de transmisión de agua (Carrica et al., 2020). En los primeros 100 m de espesor saturado el acuífero responde como libre con drenaje diferido y no debe descartarse que haya algún

grado de confinamiento en profundidad (Albouy *et al.*, 2005). En el aporte de Albouy *et al.* (2005) y en base a ensayos realizados en inmediaciones de la localidad de Cabildo, se refieren, para los primeros 100 m de espesor saturado una transmisividad de entre 54 y 230 m²/d, una conductividad hidráulica media de 1 m/d y un valor de coeficiente de almacenamiento promedio de 0,1.

La calidad química del agua del agua subterránea decrece desde el área periserrana hacia el sur, conforme la circulación general del flujo en el acuífero. En efecto, existe una correlación entre el total de sólidos disueltos (TSD) en las aguas subterráneas de la capa freática y su componente principal de circulación. Los valores más bajos de TSD, menores a 320 mg/l se sitúan en las zonas proximales a las sierras, en coincidencia con el área preferencial de recarga (Bonorino *et al.*, 1997). En áreas próximas a los afloramientos el agua califica como dulce y químicamente apta para consumo humano, pero en general, se trata de aguas dulces a salobres, bicarbonatadas o cloruradas sódicas, con una conductividad eléctrica entre 1.000 y 2.500 µS/cm y con contenidos en fluoruros y arsénico no aptas para consumo humano según el Código Alimentario Argentino.

El acuífero abastece a la localidad de Cabildo (2.000 habitantes) y la empresa Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA) emplazó algunos pozos someros (de 50 m) para extracción de agua subterránea a Bahía Blanca en el Bajo San José, dentro del valle medio del río Sauce Grande (Albouy *et al.*, 2012). Años después, luego de la sucesión de años secos (período 2005-2009) con una media pluviométrica muy por debajo del módulo anual, construyó una batería de 16 pozos, cerca de Cabildo, que inyectan agua al acueducto proveniente del dique. En áreas serranas suele explotárselo con fines de riego con pozos de hasta 100 m de profundidad y todos los establecimientos rurales de la región se abastecen de la capa freática con pozos someros perforados o cavados hasta los 70 m.

Agua subterránea en los médanos costeros

En el sector costero del sudoeste bonaerense, desde el balneario Monte Hermoso y hasta la Base Naval de Puerto Belgrano, se destaca como principal geoforma un cordón medanoso de orientación este-oeste que limita al norte con la llanura pampeana y al sur con el océano Atlántico; el mismo abarca parte de los partidos de Monte Hermoso y Coronel Rosales, cubriendo una superficie de unos 400 Km². En el sector se identifican dos sistemas acuíferos sobreimpuestos, el primero y más profundo representa al acuífero pampeano, alojado en sedimentos loésicos de la llanura circundante, cuyas aguas suelen ser salobres, de pobre calidad química y con tenores de fluoruros y arsénico que las vuelven no aptas para el consumo humano (Albouy *et al.*, 2020; Ruffo *et al.* 2021a). Desde un punto de vista hidrodinámico, el flujo subterráneo de carácter regional, descarga en el mar argentino.

Sobreyaciendo los sedimentos pampeanos se ubica el cordón costero medanoso, compuesto principalmente por sedimentos psamíticos, tanto de origen marino (depósitos de playa), fluvial (relleno de paleocauces) y principalmente eólicos. Este conjunto de depósitos arenosos configura el acuífero freático libre, que constituye la única fuente de abastecimiento para las localidades del sector. El agua alojada en él es en su mayoría dulce, principalmente bicarbonatada cálcica/sódica, con valores de conductividad eléctrica promedio de 800 µS/cm y prácticamente sin contenidos de fluoruros y arsénico. La geometría del cuerpo acuífero es compleja, ya que el hidroapoyo no es plano, resultado de procesos erosivos relacionados a distintas ingresiones marinas ocurridas durante el período Neógeno y a la migración de antiguos cauces fluviales (Ruffo, 2022). La topografía de los campos de dunas, con sectores altos y bajos, continuos y sucesivos, posibilita el desarrollo de un flujo local íntimamente relacionado con los rasgos superficiales. El nivel freático que suele encontrarse a menos de 5 m de profundidad, tiende a copiar al topográfico de forma suave, reconociéndose domos con flujos radiales divergentes hacia los sectores de interduna. En estos sectores

topográficamente deprimidos, es donde el nivel freático puede aflorar, generando lagunas intermitentes también llamados “ojos de agua” (Ruffo *et al.*, 2021b). La descarga del acuífero se produce en los sectores de interduna, anteriormente mencionados, al sur en el Mar Argentino y al norte en distintos sectores de la llanura pampeana. Tanto hacia su límite norte como en su límite sur, la diferencia de salinidad entre el agua dulce del acuífero y su contorno de mayor tenor salino, generan zonas de mezcla caracterizadas por cuñas salobres y/o salinas (Ruffo *et al.*, 2021c). El espesor saturado medio es de 20 m, pudiendo llegar a los 45 m en algunos sectores centrales de la cadena de dunas. La explotación del recurso hídrico subterráneo se realiza a través de bombas de embolo impulsadas por energía eólica (molinos) y por bombas centrifugas eléctricamente accionadas.

Agua subterránea en los médanos del partido de Villarino

En la porción septentrional del partido de Villarino, sobre la depresión tectónica de la Cuenca del Colorado, se ubica un cordón psamítico (Fm. Médanos; Bonorino, 1974), que aloja el acuífero libre que abastece a la población rural del sector y a las localidades de Médanos, La Mascota y Argerich. Se enmarca, a nivel regional, dentro de la llanura bonaerense y comprende los médanos continentales que se extienden por unos 50 km en dirección noroeste-sudeste, desde la laguna Chasicó y el arroyo homónimo hasta el estuario de Bahía Blanca, limitando parcialmente al noreste con el Salitral de la Vidriera y al suroeste con las Salinas Chicas. El acuífero es explotado en la ciudad de Médanos por la prestataria de servicios Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA), abasteciendo a alrededor de 4.500 habitantes, mientras que parte de La Mascota y Argerich, además de la población rural, se proveen mediante perforaciones particulares.

Estudios regionales antecedentes en el área incluyen, entre otros, los realizados por Wichman (1918), García y García (1964) y DYMAS (1974), y las contribuciones de carácter local de Bonorino (1974, 1979) y Lexow y Bonorino (2012) en los alrededores de la ciudad de Médanos. Carrica *et al.* (2012) evaluaron la recarga en el cordón arenoso de la localidad homónima, cifrándola entre el 33 y el 35% (185 a 195 mm anuales) de las precipitaciones promedio. Este manto eólico yace en discordancia sobre las demás unidades del área, alcanzando los 15 metros de espesor/altura. Datos propios inéditos y relevados en el marco de una investigación en desarrollo, indican que el nivel freático se encuentra entre los 13,5 y los 2,5 m de profundidad, con las mayores profundidades registradas en el sudeste de la cadena, coincidente con las cotas topográficas más elevadas. En términos generales, según estudios geoelectrónicos (sondeos eléctricos verticales y tomografías de resistividad eléctrica), el espesor del acuífero alojado en los médanos varía en general entre los 3 y los 5 m, con un promedio de 4,5 m. Se reconocieron sectores con estructuras en profundidad asimilables a paleocauces, donde el espesor saturado con agua dulce es considerablemente mayor, llegando a superar los 30 m (Rey *et al.*, 2022). Este acuífero libre se encuentra superpuesto y conectado hidráulicamente al alojado en la Fm. Río Negro y Chasicó, que en la zona se encuentra conformada por limos con intercalaciones arenosas y arcillosas con aguas de mala calidad química, presentando un comportamiento acuícludo-acuitardo. Por debajo de los 50 m de profundidad pueden encontrarse niveles acuíferos semiconfinados-confinados, con aguas salinizadas naturalmente.

La dirección del agua subterránea sigue a grandes rasgos la inclinación general del terreno, con flujos radiales superpuestos de descarga en las áreas interduna (Albouy, 2005), condicionados por la morfología local, dando lugar en ocasiones a depresiones donde aflora el nivel freático. Las depresiones del Salitral de la Vidriera, Salinas Chicas y la Laguna Chasicó constituyen las zonas de descarga del sistema acuífero. De esta manera, el acuífero freático, con agua dulce y de espesor relativamente reducido, pasa rápidamente en transición lateral y en profundidad a una zona de mezcla con aguas salinas más profundas

y de recorrido más extenso (Carrica *et al.*, 2012). En base a ensayos de bombeo y datos antecedentes (Bonorino, 1979), se determinó para el cordón de dunas una porosidad del 20%, una conductividad hidráulica media de 17 m/d y transmisividades que varían entre 32,5 y 101 m²/d, parámetros coincidentes con los obtenidos por otros autores en ambientes similares. La calidad química del agua es variable y se encuentra condicionada fuertemente por el clima semiárido de la región y la presencia de salinas y salitres, decreciendo conforme circula por el terreno hacia las zonas de descarga anteriormente mencionadas. Los valores de conductividad eléctrica medidos se ubican en promedio en los 1.923 μ S/cm, con máximos de 9.090 μ S/cm y mínimos de 385 μ S/cm. La composición iónica de las aguas de la capa freática es predominantemente bicarbonatada y clorurada sódica. La presencia de fluoruros y arsénico en algunas de las captaciones en la zona estaría asociada a la explotación, al menos en parte, de niveles más profundos, correspondientes a las Fm. Río Negro y Chasicó.

CONCLUSIONES

En la región de estudio, el recurso hídrico subterráneo suplementa el abastecimiento a las ciudades más importantes como Bahía Blanca y Punta Alta, constituye la única fuente de los núcleos urbanos cabeceras de distritos y pueblos y sustenta el desarrollo industrial (Polo Petroquímico de Bahía Blanca) y agropecuario de las amplias áreas rurales. En toda el área del trabajo queda demostrada la disponibilidad de recursos hídricos y en este sentido, en todo el suroeste bonaerense, se destaca el interés y relevancia que adquiere la explotación y utilización del agua subterránea para satisfacer todas las necesidades de suministro.

El conocimiento hidrogeológico de los distintos acuíferos y de la calidad natural del agua que alojan, deben proyectarse en la planificación hídrica para establecer un equilibrio entre la demanda y el desarrollo socio económico regional. En particular, el empleo de agua subterránea no apta para consumo humano en distintas actividades, podría conllevar un ahorro de agua de la red domiciliaria en los núcleos urbanos más importantes. La investigación y estudios de detalle del recurso, con miras a la definición de modelos conceptuales hidrogeológicos y de funcionamiento de los diferentes acuíferos, representan un elemento científico básico e indispensable a tener en cuenta en el marco de una explotación racional y sustentable del recurso y encarar acciones para su preservación, en términos de cantidad y calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Albouy, R. (1994).** *Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires.* [Tesis de Doctorado]. Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Sur. <http://bc.uns.edu.ar/>
- Albouy, R. y Bonorino, G. (1997).** Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52 (1):339-354.
- Albouy, R. (2005).** Estudio hidrogeológico expeditivo en proximidades de la localidad de Argerich, provincia de Buenos Aires. Informe FUNSA, 7 pp. (Inédito).
- Albouy, R., Carrica, J. y Bonorino, G. (2005).** Identificación y análisis del fenómeno del drenaje diferido en sedimentos pampeanos. Cuenca del Arroyo Napostá Chico, provincia de Buenos Aires. *IV Congreso Argentino de Hidrogeología*. Actas I: 259-268. ISBN 950-665-346-1 / 950-665-348-8 OC.
- Albouy, R., Carrica, J. y Lafont, D. (2010).** Crisis hídrica de la ciudad de Bahía Blanca: sustentabilidad de la explotación del recurso hídrico subterráneo para abastecimiento humano.

I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. En: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras, Tomo II: 449-456. Azul, Buenos Aires, Argentina. Varni, Entraigas, Vives Editores. ISBN 978-987-543-392-2. 366 pp.

Albouy, R., Carrica, J., Lexow, C., Lafont, D. y Bonorino, G. C. Lexow, D. Lafont y Bonorino, G. (2011). Abastecimiento de agua a Bahía Blanca. Ubicación y diseño de la batería de pozos de explotación de agua subterránea. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología. En: Captación y modelación del agua subterránea*. Actas: 3-10. E-Book ISBN 978-987-23936-8-7, Salta, Argentina. 210 pp.

Albouy, R., Carrica, J., Lexow, C., Lafont, D. y Bonorino, G. (2012). La explotación del recurso hídrico subterráneo: una alternativa para suplementar el abastecimiento a Bahía Blanca, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (28): 15-24.

Albouy, R., Bonorino, G., Carrica, J., Lexow, C., Lafont, D., Marcos, A y Caló, J. (2013). Groundwater extraction of the Napostá Chico watershed. An alternative to supplement the supply of water to Bahia Blanca city, Argentine. *WATARID III: Usages et Politiques de l'eau en zones arides et semi-arides*. Volume 3: 49-59. ISBN: 9782705 687458. Hermann Éditeurs. París, France. 558 pp.

Albouy, R., Ruffo, A., Giorgi, J. M. y Bastianelli, N. (2020). Agua subterránea en la franja medanosa austral del suroeste bonaerense, Argentina. Factores que condicionan su aptitud para consumo humano. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología. Edición Especial: Contaminación del Agua subterránea en Argentina*: 12-23.

Auge, M. (2004). Regiones Hidrogeológicas República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. En: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15909>

Auge, M., Wetten, C., Baudino, G., Bonorino, G., Gianni, R., González, N., Grizinik, M., Hernández, M., Rodríguez, J., Sisul, A., Tineo, A. y Torres, C. (2006). Hidrogeología de Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1): 7-23.

Bonorino, A. G. (1974). Contribución al conocimiento de las aguas subterráneas de la zona de Médanos, partido de Villarino (Provincia de Buenos Aires). Informe C.I.C. de la provincia de Buenos Aires. La Plata. (Inédito).

Bonorino, A. G. (1979). Estudio hidrogeológico para la provisión de agua subterránea en la zona de Médanos, partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. *VI Congreso Geológico Argentino*. Bahía Blanca. Actas 443-465.

Bonorino, A. G. (1988). *Geohidrología del sistema hidrotermal profundo de Bahía Blanca*. [Tesis de Doctorado]. Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Sur. <http://bc.uns.edu.ar/>

Bonorino, G., Carrica, J., Albouy, R., Torrente, H. y Lexow, C. (1990). *Plan Integral de Abastecimiento de Agua a Bahía Blanca y Gran Bahía Blanca: Estudio de la provisión de agua mediante extracción de aguas subterráneas*. Convenio MOP-UNS-CIC. Informe Final, Tomo IV: 76 pp. (Inédito).

Bonorino, G., Albouy, R. y Carrica, J. (1997). Provisión de agua a Bahía Blanca mediante la extracción de agua subterránea. *I Congreso Argentino de Hidrogeología*. Bahía Blanca. Actas: 77-88.

Bonorino, G., Albouy, R. y Carrica, J. (2001). Hidroquímica de un acuífero loésico. *Geoacta* (26): 33-45.

Bonorino, A. G. (2005). Acuíferos profundos e hidrotermalismo. *XVI Congreso Geológico Argentino*. Relatorio: 327-346. La Plata.

Campo de Ferreras, A., Capelli de Steffens, A. y Diez, P. (2004). El clima del suroeste bonaerense. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo. Ed. EdiUNS. ISBN: 987-1171-06-4. 105 pp.

Carrica, J. (1998). *Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires*. [Tesis de Doctorado]. Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Sur. <http://bc.uns.edu.ar/>

- Carrica, J., Rossi, P., Albouy, R. y Bonorino, G. (1992).** Hidroquímica del agua subterránea del sector pedemontano de la vertiente occidental de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. *3º Jornadas Geológicas Bonaerenses*. La Plata. Actas: 159-164.
- Carrica J. C., Lexow, C. y Bonorino, A. G. (2012).** La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, Prov. de Buenos Aires, Argentina. En: "Agua Subterránea: Manantial de vida para aprovechar y proteger" Ed. ALHSUD. *XI Congreso latinoamericano de Hidrogeología*. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias en CD.
- Carrica, J., Albouy, R., Carrica, L. y Silva, G. (2017).** Delimitación de perímetros de protección de pozos de explotación de agua subterránea ubicados en cercanías de Cabildo, provincia de Buenos Aires. *IV Congreso Bianual PRODECA. Universidad Tecnológica Nacional FRBB*. Bahía Blanca. Soporte digital: Contaminación atmosférica e hídrica en Argentina. Contribuciones del VI Congreso PROIMCA y IV Congreso PRODECA. ISBN: 978-987-1896-86-8. Sello Editor: EdUTecNe.
- Carrica, L., Carrica, J. y Albouy, R. (2020).** Estado actual del conocimiento de los acuíferos en el partido de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. Estudio preliminar. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (45): 19-31
- DYMAS (1974).** Dirección de Yacimientos, Minería y Aguas Subterráneas Contribución al mapa hidrogeológico de la provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Zonas de Bahía Blanca y Nordpatagónica. CFI-PBA. La Plata. (Inédito).
- Fidalgo, F., De Francesco F. y Pascual, R. (1975).** Geología superficial de la llanura bonaerense. *V Congreso Geológico Argentino*. Bahía Blanca. Relatorio: 103-138.
- Fidalgo, F. (1983).** *Geología y Geomorfología del área White-Cerri y los alrededores de Bahía Blanca*. Comisión Estudios de Suelos White-Cerri. MOP de la provincia de Buenos Aires. La Plata. Informe final (Inédito).
- García, J. y de García, O. (1964).** *Hidrogeología de la región de Bahía Blanca (provincias de Buenos Aires y La Pampa)*. Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín No 96. Buenos Aires. 93 pág.
- González, N. (2012).** Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires: https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/NATURALIS_aa6375647a65d74c8b5b45e8a44ede31
- INDEC (2010).** Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Buenos Aires. <https://www.indec.gob.ar/>
- Lexow, C. y Bonorino, A. G. (2012).** Estudio hidrogeológico de Médanos. Convenio FUNSA-ABSA. (Inédito).
- Rey, M., Ruffo, A., Giorgi, J.M., Albouy, R., Carrica, L. y Bastianelli, N. (2022).** Tomografías de resistividad eléctrica: prospección de agua subterránea en un cordón medanoso del sudoeste de la provincia de Buenos Aires. *XI Congreso Argentino de Hidrogeología*. Bahía Blanca (Enviado).
- Ruffo, A.G. (2022).** *Hidrogeología de las dunas, en el ambiente costero suroccidental de la provincia de Buenos Aires, Argentina*. [Tesis de Doctorado]. <http://catalogo.uns.edu.ar/>
- Ruffo, A.G., Albouy, R., Giorgi, J. M., Rey, M., Carrica, L., Bastianelli, N. (2021a).** The prheatic aquifer in the Coastal dunes of southwestern Buenos Aires province, Argentina. Factors conditioning groundwater quality. *Journal of Ecology & Natural Resources*; Lugar: Michigan; Año: 2021 vol. 5 p. 1 – 7. DOI: 10.23880/jenr-16000260
- Ruffo A. G., Albouy, R., Bastianelli, N., Carrica, J. (2021b).** Humedales en la franja de médanos costeros entre Monte Hermoso y Pehuen-Có, provincia de Buenos Aires, Argentina. Tipificación hidrológica. *Boletín Geológico y Minero de España*, 132 (1-2): 29-36 ISSN: 0366-0176 DOI: 10.21701/bolgeomin.132.1-2.003
- Ruffo A.G., Albouy R., Giorgi J.M., Rey M., Carrica L., Bastianelli N. (2021c).** Tomografías de resistividad eléctrica aplicadas a la prospección de agua subterránea en un sector costero del

sudoeste bonaerense. *Actas 1° Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2° Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. ISBN: 978-987-21766-6-2.

Thorntwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. Reprinted from the *Geographical Review*, 38(1):55-94.

Wichmann, R. (1918). *Geología e hidrogeología de Bahía Blanca y sus alrededores (Provincia de Buenos Aires)*. Anales Ministerio Agricultura de la Nación, Sec. Geol. y Minería, XIII, N° 1. Buenos Aires.

Trabajo recibido el 16/06/2022 y aprobado para su publicación el 07/07/2022.

Cómo citar este artículo

Albouy, R; Bastianelli, N.; Ruffo, A.; Carrica, L.; Giorgi, J.M.; Rey, M. (2022). El recurso hídrico subterráneo y su explotación en la región de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, Argentina, *Revista Argentina de Hidrogeología*, 1:59-78

ACUÍFEROS COSTEROS EXPLOTADOS INTENSAMENTE. MODELO CONCEPTUAL, RESPUESTA HIDRODINÁMICA Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ACUÍFERO DE MAR DE PLATA

INTENSELY EXPLOITED COASTAL AQUIFERS: CONCEPTUAL MODEL, HYDRODYNAMIC RESPONSE AND NUMERICAL SIMULATION OF THE MAR DEL PLATA AQUIFER.

*Emilia Bocanegra*¹, *Orlando Mauricio Quiroz Londoño*^{1,2},
Sebastián Grondona^{1,2}; *Daniel Martínez*^{1,2}

1 Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Universidad Nacional de Mar del Plata-Comisión de Investigaciones Científicas Bs. As. Funes 3350. Mar del Plata, Argentina.

2 Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC), Universidad Nacional de Mar del Plata-CONICET. Funes 3350. Mar del Plata, Argentina

Mail de autor de correspondencia: emilia.bocanegra@gmail.com

RESUMEN

La hidrogeología urbana en zonas costeras comprende el conocimiento de la cantidad, calidad y gestión del agua en relación con acuíferos bajo áreas urbanizadas que tienen como contorno la interfaz entre el continente y el mar. Mar del Plata, ubicada sobre la costa atlántica argentina se abastece exclusivamente del agua subterránea para satisfacer el consumo humano y las diversas actividades productivas. El objetivo del trabajo es actualizar el modelo conceptual del acuífero de Mar del Plata, analizar la respuesta hidrodinámica ante una explotación intensiva y presentar una herramienta numérica que reproduce dicho comportamiento ante distintas estrategias de gestión del recurso hídrico subterráneo. La integración de los distintos componentes del marco físico del acuífero, las acciones externas naturales y antrópicas de recarga y descarga, y los procesos de flujo llevó a la actualización del modelo de funcionamiento del sistema hídrico subterráneo. Se efectuó la construcción y calibración del modelo numérico 2D de flujo en régimen estacionario y dinámico a través de la utilización del código Modflow y de la interfaz gráfica Model Muse para la gestión de datos. Los resultados del modelo numérico de flujo permitieron confirmar el modelo conceptual propuesto y reproducir a través de la simulación las estrategias de gestión desde los comienzos de explotación hasta la actualidad. Se espera que este modelo pueda ser usado como herramienta de gestión de la cantidad y de la calidad de los recursos hídricos subterráneos y permita optimizar los esquemas de extracción y la futura expansión de las áreas de captación.

Palabras clave:

Acuíferos costeros - Modelo conceptual hidrogeológico - Modelo numérico - Mar del Plata

ABSTRACT

Urban hydrogeology in coastal areas includes knowledge of the quantity, quality and management of water in relation to aquifers under urbanized areas that have as their contour the interface between the continent and the sea. Mar del Plata, located on the Argentine Atlantic coast, is exclusively supplied by groundwater to satisfy human consumption and various productive activities. The objective of the work is to update the conceptual model of the Mar del Plata aquifer, to analyse the hydrodynamic response to intensive exploitation and to present a numerical tool that reproduces said behaviour in the face of different groundwater resource management strategies. The integration of the different components of the physical

framework of the aquifer, the external natural and anthropic actions of recharge and discharge, and the flow processes led to the updating of the operating model of the groundwater system. The construction and calibration of the 2D numerical model of steady and dynamic flow was carried out using Modflow code and the Model Muse graphical interface for data management. The results of the numerical flow model made it possible to confirm the proposed conceptual model and to reproduce, through simulation, the management strategies from the beginning of exploitation to the present. It is expected that this model can be used as a tool for managing the quantity and quality of groundwater resources and will allow optimization of extraction schemes and the future expansion of catchment areas.

Key words:

Coastal aquifers - Hydrogeological conceptual model - Numerical model - Mar del Plata

INTRODUCCIÓN

Una parte importante de los asentamientos humanos y sus actividades económicas y recreativas se realizan en las regiones costeras. Las zonas costeras son espacios de transición entre los dominios continental y marino, en donde los procesos antrópicos de producción, consumo e intercambio de masa y energía se producen con muy alta tasa. Tales procesos ejercen una presión intensa sobre los recursos naturales. Uno de los principales recursos en las áreas costeras lo constituyen las aguas subterráneas que juegan un rol muy importante como la principal y en ocasiones la única, fuente de agua dulce para el consumo humano, industrial, agrícola y para el sostenimiento de los ecosistemas.

Los acuíferos costeros tienen como contorno la interfaz agua dulce-agua salada a través de la cual, en condiciones naturales, el agua dulce continental descarga al mar. La posición de dicha interfaz resulta del equilibrio entre la presión ejercida por el agua dulce y el agua salada. El agua dulce, más ligera que la salada, tiende a flotar sobre ésta, al tiempo que impide su entrada. Es decir, es el flujo de salida de agua dulce lo que impide la penetración descontrolada del agua salada. Si dicho flujo se modifica por extracción excesiva de agua dulce, se produce un avance subterráneo de la interfaz hacia el continente y un ascenso de la misma con respecto a su posición anterior. En buena medida, la gestión de acuíferos costeros se basa en entender y controlar la interacción entre el agua dulce y la salada.

Mar del Plata, ubicada sobre la costa atlántica, es la principal ciudad turística de Argentina, y se abastece para los usos urbano, agrícola e industrial exclusivamente a través del recurso hídrico subterráneo. Las diversas estrategias de gestión tendientes a satisfacer la demanda creciente desde los comienzos del siglo XX hasta la actualidad, se basaron en una explotación intensiva que dio origen a un proceso de intrusión marina en el radio urbano, lo que conllevó un abandono de pozos salinizados, posterior recuperación de niveles de agua en pozos abandonados, inundación de sótanos y afectación de estructuras edilicias en el sector céntrico. Las estrategias de gestión en sucesivos periodos extendieron la explotación del agua subterránea hacia diversas áreas rurales, en algunas de las cuales los significativos descensos piezométricos produjeron incipiente intrusión marina.

El objetivo del trabajo es actualizar el modelo conceptual del acuífero de Mar del Plata, analizar la respuesta hidrodinámica ante una explotación intensiva y presentar una herramienta numérica que reproduce dicho comportamiento ante distintas estrategias de gestión del recurso hídrico subterráneo.

Hidrogeología urbana en zonas costeras

La hidrogeología urbana en zonas costeras trata del conocimiento del flujo del agua subterránea y de la recarga, del uso y la calidad del agua y la gestión en relación con los acuíferos bajo áreas urbanizadas que tienen como contorno la interfaz entre el continente y el mar. En estas zonas los recursos hídricos para el abastecimiento de las actividades agrícolas y el desarrollo urbano y turístico proceden de los acuíferos costeros, que son intensamente explotados cuando otros recursos hídricos son escasos o inexistentes.

En las áreas urbanas los acuíferos someros son importantes elementos para el abastecimiento urbano. Por otro lado, su existencia supone posibles interacciones con edificios e instalaciones, los cuales a su vez pueden afectar al nivel freático. Pero también los acuíferos más profundos bajo el área urbana tienen interés por su importante papel geotécnico y como fuente de agua, tanto en el pasado, como actualmente y en el futuro. La hidrogeología urbana considera también los acuíferos de los alrededores (peri-urbanos) que se usan para abastecer a la población y a sus satélites urbanos, industriales, comerciales, de riegos intensivos, de recreo, parques, etc. (Custodio, 2004).

Una síntesis conceptual sobre los efectos de la explotación intensiva de las aguas subterráneas en las zonas costeras, siguiendo el esquema de Foster *et al.* (1998) para áreas urbanas y peri-urbanas se enumera a continuación, y se presenta en la Figura 1.

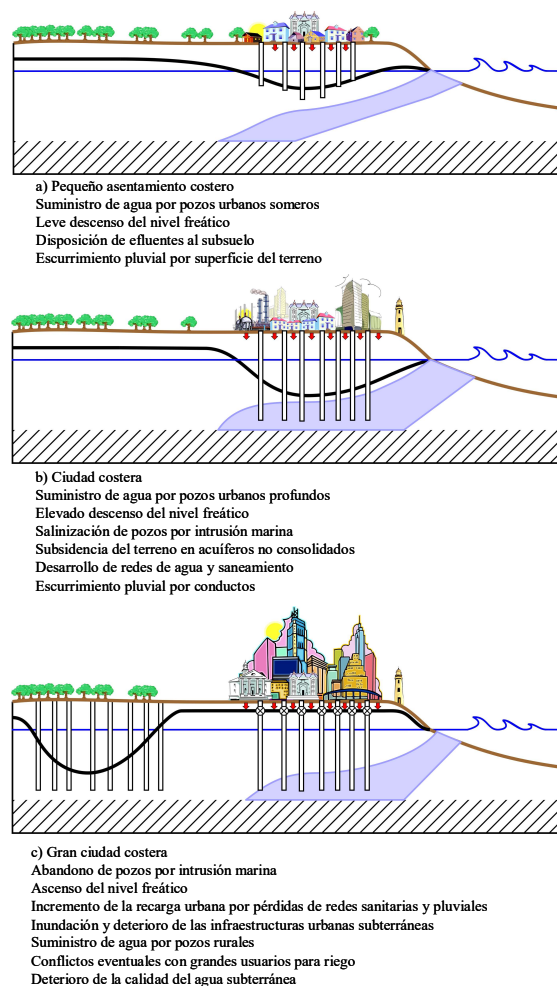


Figura 1. Efectos de la evolución urbana costera sobre los recursos hídricos subterráneos. Tomado de Foster *et al.* (1998)

- Descenso del nivel freático debido a la extracción generalmente no planificada, con el objetivo de satisfacer la demanda creciente y estacional del recurso hídrico.
- Abandono de pozos salinizados debido al proceso de intrusión marina y posterior ascenso del nivel freático. Este aumento del nivel puede producir inundación de las instalaciones subterráneas y una mayor corrosión en estructuras enterradas metálicas o realizadas con cementos no resistentes a la corrosión y al exceso de sulfatos.
- Pérdida de volumen de agua del acuífero por deterioro de su calidad, especialmente en sectores salinizados.
- Subsistencia del terreno a causa de la disminución de la presión intersticial o colapsos locales en ambientes kársticos, que puede afectar las estructuras edilicias.
- Deterioro de la calidad del agua subterránea por pérdidas de las redes sanitarias y pluviales. Otros posibles contaminantes son los productos petrolíferos fugados de tanques de almacenamiento de estaciones de servicio, el lavado de las superficies de las calles, y otros vertidos accidentales.
- Establecimiento de nuevas áreas de captación en el ámbito rural, lo que conlleva, además de los costos para construir una nueva batería de pozos, un incremento de costos en cañerías de conducción. Pueden presentarse eventualmente conflictos con los grandes usuarios de agua para riego.

Un estudio comparativo del estado del conocimiento y la gestión de acuíferos costeros urbanos y peri-urbanos en Sudamérica (Bocanegra *et al.*, 2010), realizado sobre 15 acuíferos seleccionados en base a la información publicada disponible y a su relevancia regional, permitió reconocer la existencia de tres clases principales de cuerpos costeros de agua subterránea:

- Grandes acuíferos de importancia regional: se desarrollan en grandes cuencas sedimentarias costeras, abarcando un amplio rango de ambientes depositacionales, de tipos de sedimentación y de litologías, que se han identificado en Argentina (Bahía Blanca y Mar del Plata), Brasil (Recife, Fortaleza, Maceió), Perú (Máncora) y Uruguay (acuífero Raigón).
- Pequeños acuíferos clásticos de interés local: actúan como reservorios estratégicos de agua, con gran relevancia económica y social, ocurren en dunas someras, depósitos de playa, sedimentos de loess o depósitos aluvionales en Brasil (Rio de Janeiro), en Uruguay (La Paloma), en Argentina (La Plata) y en Colombia (Santa Marta, Urabá y Morrosquillo)
- Acuíferos en pequeñas islas: caracterizados por su dificultad para establecer sus límites ya que la explotación intensiva moviliza grandes volúmenes de agua que en estos acuíferos proceden de formación adyacentes, se presentan en rocas basálticas en Chile (Isla de Pascua) y kársticas en Colombia (Isla San Andrés).
- En todos los acuíferos estudiados se verifica y documenta la mayoría de los problemas siguientes: explotación intensiva de aguas subterráneas, descenso piezométrico, intrusión marina, contaminación por falta de sistemas de saneamiento, contaminación por actividad agrícola y ganadera, contaminación por pérdidas de las redes sanitarias, subsidencia, deterioro de infraestructuras urbanas y falencias en la gestión.

ANTECEDENTES

El estudio de la hidrogeología en zonas costeras tiene larga data y es de gran importancia a nivel internacional, con gran cantidad de casos de estudio y publicaciones internacionales sobre los procesos de explotación intensiva de acuíferos, intrusión marina y su modelación. Existe una amplia bibliografía en el tema, pudiendo destacarse el enfoque de la problemática que se realiza en libros de texto tales como los de Custodio y Llamas (1976, 1983), Freeze y Cherry (1978), Domenico y Schwartz (1990), Appelo y Postma (1993), Bear (1972), Voss (1984), Voss y Souza (1987), Guiger y Franz (1996) entre otros.

El tema de la hidrogeología urbana ha sido tratado en importantes conferencias internacionales tales como el Congreso *Groundwater in the Urban Environments*, en Nottingham, UK, 1997, el *Workshop on Current Problems of Hydrogeology in Urban Areas, Urban Agglomerates and Industrial Centres* en Azerbaiján en 2001 y el Seminario El agua y las infraestructuras en el medio subterráneo realizado en Barcelona en 2008.

Las reuniones científicas internacionales periódicas han tomado el tema de intrusión marina como tópico de interés, tal como los congresos organizados por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos y la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo. Merecen citarse muy especialmente el *Seawater Intrusion Meeting (SWIM)* y el Simposio Internacional sobre Tecnología de la Intrusión de agua de mar en Acuíferos Costeros (TIAC), que se realizan periódicamente.

La temática de explotación intensiva de aguas subterráneas, que suele ser característica en las zonas costeras, ha sido tratada en conferencias específicas tal como el *Symposium on Intensively Exploited Aquifers (SINEX)*, y en sus antecesores *Seminars on Aquifer Overexploitation* en los últimos 20 años.

En Argentina, el caso más relevante y documentado del proceso de intrusión marina lo constituye el acuífero de Mar del Plata. Los primeros estudios fueron realizados por Groeber (1954), Ruiz Huidobro (1971) y Sala *et al.* (1980). Los efectos derivados de la sobreexplotación, que incluyen salinización y abandono de pozos, descensos pronunciados en el área rural y recuperación de niveles en áreas céntricas, hasta el año 1980, fueron analizados y evaluados en numerosos trabajos (Hernández *et al.*, 1989, 1991, 1992; Bocanegra *et al.*, 1993).

Se deben destacar los aportes del Grupo Hidrogeología del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, de la Universidad Nacional de Mar del Plata, que ha realizado numerosos estudios hidrogeológicos que comprenden diversos aspectos del conocimiento, los cuales se iniciaron con una caracterización preliminar del proceso de intrusión marina y su aporte a la problemática ambiental (Bocanegra *et al.*, 1989).

El estudio de los procesos hidrogeoquímicos se ha efectuado por medio de la modelación hidrogeoquímica aplicando diversos códigos específicos, lo que ha permitido estimar las interacciones del agua dulce y del agua salada entre sí y con el medio sólido (Bocanegra, 1994, Martínez *et al.*, 1996; Martínez y Bocanegra, 2002; Martínez *et al.*, 2000, 2005). Se han propuesto diversas pautas para la gestión sustentable del recurso hídrico, basadas en el conocimiento del sistema acuífero, la legislación y el monitoreo y control (Massone *et al.*, 1994).

Además, se ha comparado la problemática de la explotación de los acuíferos costeros de Mar del Plata y Barcelona, España (Bocanegra y Custodio, 1994) y de diversos acuíferos sudamericanos (Bocanegra *et al.*, 2010), estableciéndose sus similitudes y diferencias, y las bases de la cooperación científica para su estudio conjunto. De forma similar, en el trabajo de Bocanegra (2005), se analizan los efectos de la explotación intensiva de los recursos hídricos subterráneos en América latina, considerando los escenarios de grandes metrópolis, regiones áridas y regiones costeras.

Obras Sanitarias Mar del Plata SE (OSSE) ha realizado estudios de la evolución de los niveles piezométricos y de cloruros (Cionchi, 1994, Cionchi *et al.*, 2000; Mérida, 2002) y un Proyecto de implementación de una barrera de explotación para controlar la intrusión marina y producir una disminución de los niveles piezométricos en el sector céntrico (Cionchi, 2004). La comprensión de los procesos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos, y la simulación numérica del flujo y transporte de cloruros puede encontrarse en la Tesis de

Doctorado “Estrategias de gestión del acuífero de Mar del Plata. Modelo conceptual y simulación numérica” (Bocanegra, 2011).

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el Partido de General Pueyrredón, en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, en la vertiente norte del Sistema de Tandilia, entre los paralelos 37°42' y 38°05' sur y los meridianos 58° 00' y 57° 25' oeste. Posee una superficie de unos 1.100 km². Limita al norte con el interfluvio del Arroyo Vivoratá y el Arroyo Dulce, al oeste y sur con la divisoria geomorfológica entre el ambiente de sierras y lomadas y al este con el océano Atlántico (Figura 2).

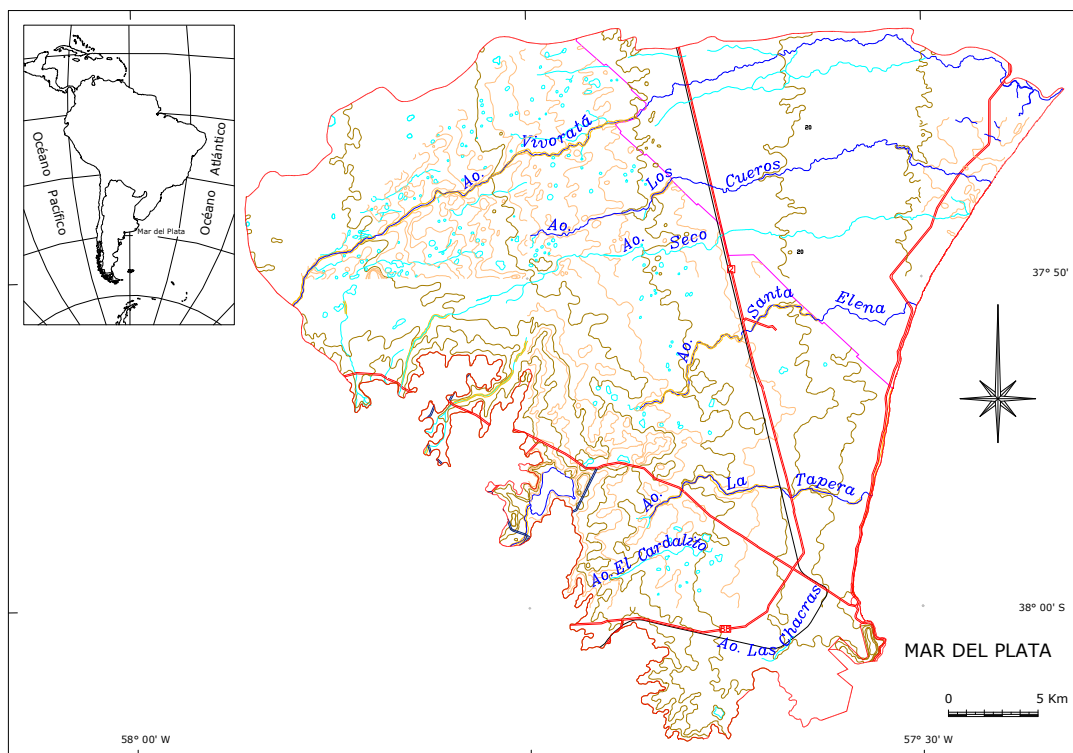


Figura 2. Mapa del área de estudio

Mar del Plata ha tenido una importante expansión urbana desde los comienzos de la década de 1950 hasta la actualidad a una tasa de unos 100.000 habitantes cada 10 años; este proceso de migración masiva contribuyó al desarrollo socio-económico regional y nacional. La población actual es de unos 650.000 habitantes. La afluencia turística se registra durante todo el año, principalmente en los meses de verano, y durante períodos vacacionales más breves en otoño e invierno.

Clima

La localización geográfica de la ciudad de Mar del Plata determina sus condiciones térmicas y pluviométricas propias del clima templado con influencia oceánica propio del sudeste de la provincia de Buenos Aires. La precipitación anual media en la ciudad según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el periodo comprendido entre 1960 y 2018 varían 578.8 mm y 1420 mm con un valor medio de 929.27 ± 179.9 mm. Cionchi y Redin (2004) reportan un incremento anual progresivo de la precipitación para la zona durante el último siglo. La distribución espacial de la lluvia muestra un gradiente en los valores totales anuales y mensuales en dirección noroeste a sureste, asociado a la distancia a la línea de

costa y localmente a efectos orográficos inducidos por las Sierras. La tendencia de la precipitación mensual para cada una de las estaciones en el período analizado muestra un régimen claramente estacional, con valores más bajos en la estación fría, de mayo a septiembre y mayores valores entre los meses de octubre y abril.

Por su parte, los valores de temperatura para el periodo comprendido entre 1994 y 2018 definen un valor medio anual de 14.24 ± 0.39 °C con una tendencia creciente. La tendencia de la temperatura media mensual muestra un régimen claramente estacional, con valores más bajos en la estación fría, de mayo a septiembre y mayores valores entre los meses de octubre y abril. Utilizando el método de Thornthwaite (1948), los valores de evapotranspiración potencial para los últimos 20 años varían entre 696 y 766 mm/año con un valor medio anual de 732 ± 26.87 (Quiroz Londoño *et al.*, 2020). Si se tiene en cuenta los valores medios reportados anteriormente, se encuentra que en la zona existe un balance que en la mayoría de los casos presenta excedentes.

Geología

Geológicamente, el área donde se emplaza la ciudad de Mar del Plata se caracteriza por una aparente sencillez con tres unidades estratigráficas bien diferenciadas, enmarcando el punto de contacto entre las sierras que conforman el sistema serrano de Tandilia y el mar Argentino, dividiendo la región en dos vertientes, a las que se las ha denominado: septentrional y sur respectivamente (Cionchi *et al.*, 2000).

La unidad más antigua que se encuentra en el área es el Basamento cristalino, asociado a rocas ígneo-metamórficas precámbricas definidas como como complejo Buenos Aires por Marchese y Di Paola (1975). Estas rocas se encuentran totalmente cubiertas con algunos escasos afloramientos, que se corresponden con frentes de pequeñas canteras en el flanco norte del sistema serrano de Tandil.

Suprayaciendo discordantemente al basamento, se encuentra una secuencia paleozoica (Ordovícico inferior) denominada como Formación Balcarce (Dalla Salda e Iñiguez 1979). Estas rocas se han asociado a un ambiente de deposición de transgresión marina, en los que predominan areniscas de cuarzo (ortocuarzitas) y conglomerados con estratos que presentan espesores variables entre 0,30 y 1 m, con algunos afloramientos en la parte sur de la ciudad y en la zona costera. El conjunto de estas dos unidades conforma el sistema serrano, el cual es afectado por sistemas de fracturas de alto grado, frecuentemente subverticales, atravesadas por fallas con orientación NE-SO, las cuales ejercen un fuerte control en la evolución y morfología del paisaje (Teruggi y Kilmurray 1975).

Finalmente, y cubriendo toda la región se encuentra una secuencia sedimentaria de edad Cenozoica, relativamente homogénea en la que predominan limos “loessoides” y niveles arenosos finos a muy finos, de color pardo amarillento, de origen esencialmente eólicos (Figura 3). Estos sedimentos fueron retrabajados y depositados en un ambiente álcico, sobre un relieve relativamente bajo y llano, en condiciones climáticas cambiantes, aunque con un cierto predominio de clima seco y frío con intervalos algo más cálidos y húmedos (Isla *et al.* 2018; Teruggi y Kilmurray, 1975; Teruggi *et al.*, 1962; Teruggi 1957, Zárate y Fasano, 1984). En la depositación de estos sedimentos tienen una significativa participación las cenizas volcánicas, en las que, a juzgar por la mineralogía de las mismas, el área de aporte se localizaría en el piedemonte andino (Teruggi, 1957).



Figura 3. Rocas estratificadas de la Formación Balcarce y Sedimentos loessoides del Cenozoico.

Geomorfología

Los ambientes geomorfológicos en la zona de estudio comprenden: Sierras, Lomadas y Llanura (Sala *et al.*, 1980), denominados Sierras, Franja eólica periserrana y Llanura fluvioeólica por Martínez (1997, 1998).

Sierras: están constituidas por elevaciones del sistema de Tandilia, o Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires, que, a partir de Sierras de Los Padres, en dirección sudeste, se presentan como un conjunto de lomas y colinas bajas, exclusivamente de ortocuarcitas, cubiertas en algunos casos por una delgada capa de sedimentos cuaternarios.

Lomadas o Franja Eólica Periserrana: geformas alargadas y redondeadas, adosadas e integradas al frente serrano nororiental. Las lomas ocupan los valles interserranos, y en algunos casos cubren las cumbres de las sierras (Martínez 1998). Conforman, en general un relieve ondulado con pendientes medias de 3 a 4 %. En el sector occidental se extienden entre las isohipsas de 60 y hasta 120 m, mientras que en el sudeste, sus alturas medias varían entre 12 y 80 m sobre el nivel del mar.

Llanura o Planicie Fluvioeólica: se extiende en el sector norte de la vertiente septentrional, sobre todo a partir del interfluvio entre los arroyos La Tapera y Santa Elena y llega hasta el mar. El relieve tiene escasa pendiente (0,1%) y presenta numerosos bajos alargados y subredondeados que, en general se interconectan en épocas de lluvias (Sala *et al.*, 1980).

El sistema de drenaje está formado por cursos de bajo potencial morfogenético subparalelos que nacen en el ámbito serrano y desembocan en el mar.

Hidrogeología

La región se caracteriza por la presencia de las unidades hidrogeológicas *Basamento Impermeable* y *Complejo Clástico Permeable*, definidas por Sala (1975).

El *Basamento Impermeable* está conformado por las sedimentitas eopaleozoicas de la *Fm Balcarce* (Dalla Salda e Iñíguez, 1978). Se trata de rocas consideradas acuífugas que poseen permeabilidad secundaria asociada a la existencia del sistema de diaclasas integrado por tres juegos de fracturas de posición subvertical y rumbos NE-SO; NO-SE y E-O, interconectados parcialmente por un cuarto grupo subhorizontal, coincidente con los planos de estratificación (Mauriño *et al.*, 1981).

El *Complejo Clástico Permeable* suprayace al *Basamento* y comprende las secciones: *Hipoparaniana*, *Paraniana* y *Epiparaniana*, de las cuales sólo esta última tiene interés hidrogeológico a los fines de la explotación.

La sección *Epiparaniana* constituye un complejo sedimentario de origen eólico y fluvioeólico, de composición muy variable limos loessoides, en parte arcilloso a algo arenoso fino a muy fino, con abundante vidrio volcánico y carbonato de calcio desde pulverulento a capas de tosca distribuida en manchones irregulares y de diferentes grados de compactación. Su comportamiento está definido como “ambiente acuitardo, de baja permeabilidad, dentro del cual se desarrollan lentes de mediana permeabilidad portadora de niveles acuíferos productivos” (Sala, 1975).

Los espesores del acuífero varían desde unos 70 m en el sector céntrico de Mar del Plata hasta alrededor de 100 m en los sectores rurales de la vertiente septentrional. Los valores promedios de transmisividad obtenidos por ensayos de bombeo oscilan en pozos próximos a los distintos cauces de los arroyos, entre 900 y 1300 m²/d; estos elevados valores junto con los resultados de los perfiles litológicos, induce a suponer la presencia de paleocauces debido a condiciones similares de depositación de sedimentos durante el Cenozoico. En el resto del área rural y en el área urbana marplatense se presentan valores promedio de unos 850 m²/d con desvío estándar de 350 m²/d. Los coeficientes de almacenamiento varían desde 10⁻³ en el sector sur de la ciudad de Mar del Plata, hasta 3.10⁻² en los otros sectores la cuenca (Bocanegra, 2011).

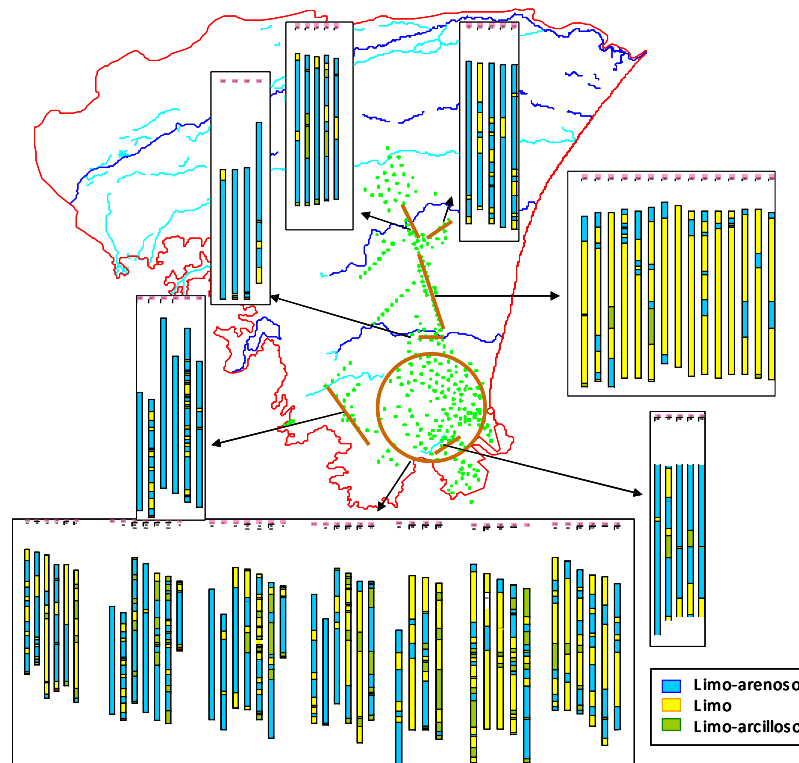


Figura 4. Distribución espacial de perfiles litológicos de perforaciones de Obras Sanitarias

Se ha analizado la distribución espacial de perfiles litológicos de unas 110 perforaciones de Obras Sanitarias realizados por Cionchi (2007). La Figura 4 presenta algunos perfiles, cuyas profundidades oscilan entre 85 y 90 m, en los cuales se han

identificado sedimentos limo-arenosos, limosos y limo-arcillosos, y que pueden asociarse a diferentes ambientes hidrogeológicos:

- Zona Centro: se presentan numerosas capas acuíferas separadas por acuitardos, mostrando una gran anisotropía vertical.
- Interfluvio: aparece una fina capa acuífera superior y el resto de la columna tiene comportamiento acuitardo.
- Paleocauces: en zonas próximas al cauce de los arroyos Santa Elena, La Tapera y Las Chacras los perfiles presentan casi exclusivamente sedimentos limo-arenosos.
- Lomadas: se aprecia una mejora de la granulometría de los sedimentos.

Salinización del acuífero e hidroquímica

La sobreexplotación de acuíferos costeros tiene su efecto directo en el descenso de los niveles freáticos lo que, como se ha dicho más arriba, ocasiona el ingreso de agua de mar que, al mezclarse con el agua del acuífero, modifica su composición (Moujabber *et al.*, 2006; Shi *et al.*, 2014; Venâncio *et al.*, 2022). Esta modificación es en general perjudicial, al registrarse un incremento significativo de la salinidad que puede llegar a hacer no potable el recurso. Las características de composición química e isotópica del agua de mar son comúnmente muy contrastantes con el agua de los acuíferos costeros, lo cual hace de estas propiedades buenos trazadores para el estudio del proceso de intrusión marina. Entre los trazadores químicos, el cloruro es reconocido por su carácter conservativo, y su contenido promedio del orden de 19.000 mg/L resulta en gradientes de concentración de fácil seguimiento.

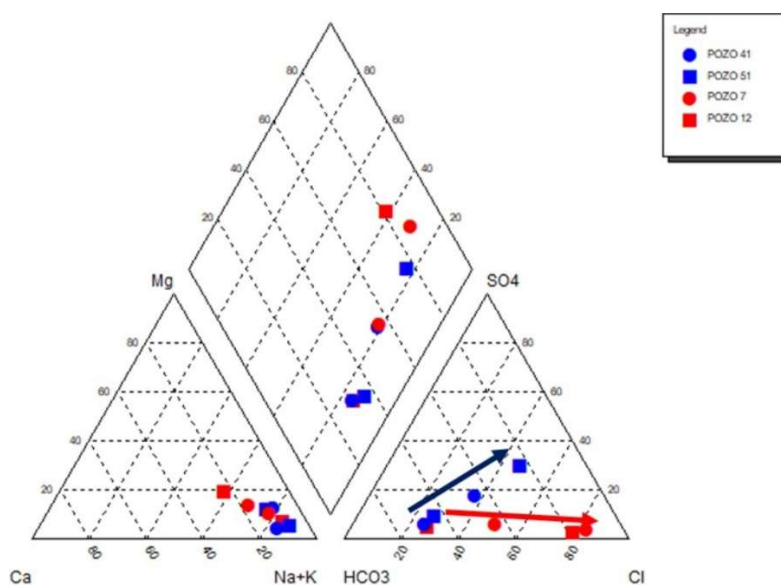


Figura 5. Evolución hidroquímica de los pozos del centro de la ciudad (en color rojo) y del puerto (en color azul) antes y después de la intrusión marina

En el caso del estudio de la contaminación por intrusión marina en el acuífero de Mar del Plata, el ingreso de agua salada está considerado en el trabajo de Ruiz Huidobro y Tófaló (1975), donde el uso de trazadores isotópicos ya tiene su primera mención en este acuífero. Posteriormente varios trabajos se basaron fundamentalmente en el uso de la concentración de cloruros, como indicadores del avance de la intrusión marina (Bocanegra *et al.*, 1993; Mérida, 2002; Martínez y Bocanegra, 2002; Martínez *et al.*, 2005). Siguiendo un desarrollo temporal en el cual la evolución hidroquímica ha acompañado a los resultados de la sobreexplotación primero, y la gestión sustentable luego, el trabajo de Bocanegra *et al.*

(1993) muestra cómo se produjo la intrusión marina sobre la base del incremento de cloruros, y el trabajo de Mérida (2002) muestra cómo se produce una recuperación de la calidad del agua a partir del año 1990, como resultado de los cambios en el diseño de la explotación. En el sector centro de la ciudad se alcanzaron contenidos de cloruro de hasta 2400 mg/L, más de 20 veces el fondo natural del acuífero. La evolución de las facies hidroquímicas observada fue desde una composición bicarbonatada sódica a clorurada-sulfatada sódica, según la mezcla con agua de mar (Bocanegra *et al.*, 1993). En el sector del puerto de la ciudad, la salinización también tuvo lugar, pero la tendencia evolutiva de las aguas fue hacia una facies más sulfatada, y con contenidos máximos de cloruro del orden de los 500 mg/L (Martínez *et al.*, 2005) (Figura 5). Como consecuencia del abandono de pozos y de la implementación de nuevos diseños de explotación por parte de la empresa Obras Sanitarias, la calidad química fue recuperándose en forma conjunta con la recuperación de niveles (Figura 6).

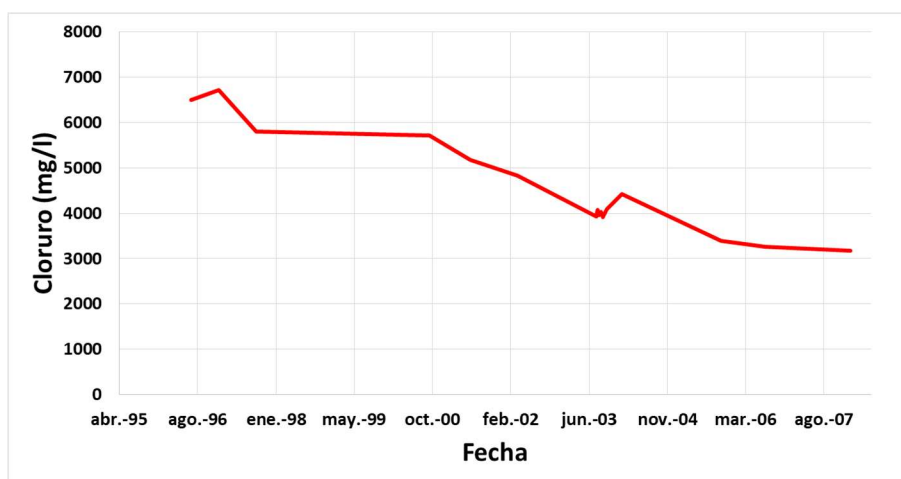


Figura 6. Evolución de los contenidos de cloruros en el Pozo 1 de Obras Sanitarias, en el centro de la ciudad.

EL MODELO NUMÉRICO COMO APOYO A LA GESTION DEL ACUIFERO PAMPEANO

El manejo del acuífero costero de Mar del Plata, Argentina, es un problema de difícil abordaje debido principalmente a la presión que se ejerce sobre el recurso como resultado de la alta demanda de los cerca de 700000 habitantes permanentes, el incremento de población durante los meses de verano y a la vulnerabilidad de todo acuífero costero debido a los problemas asociados a su explotación intensiva. Un importante efecto de intrusión marina ocurrió durante los años 50 del siglo pasado con el consecuente abandono de pozos de abastecimiento y la necesidad de desplazar la zona de explotación a un área al norte de la ciudad. Después de que nuevas zonas de explotación han sido abiertas en la ciudad, la sustentabilidad del recurso bajo el cambio climático constituye un desafío complejo para la entidad gestora del agua subterránea, Obras Sanitarias de Mar del Plata –Batán OSSE.

En el contexto de la iniciativa WaterClimate-Lac, financiada por la Unión Europea a través del programa EUROPEAID, un importante acuerdo fue logrado entre WaterClimate-Lac, zonas costeras y OSSE para el desarrollo e implementación de un modelo matemático para la simulación de nuevas zonas de bombeo y el efecto de diferentes escenarios de cambio climático. Dicho modelo fue implementado en el software Modflow 2005 y la interfaz gráfica ModelMuse. El modelo fue implementado inicialmente en estado estacionario para el año 1912 y luego en estado transitorio para el periodo 1913 - 2016.

Para la implementación de este modelo se utilizaron los datos de caudal gestionados por OSSE, la recarga fue discriminada a partir de mapas de cobertura de uso del suelo, en las zonas urbanas fueron consideradas pérdidas desde la red de distribución, asumiendo valores cercanos al 30% del total usado en el servicio de abastecimiento de la ciudad. Fueron consideradas, además, series temporales de evapotranspiración. Los valores de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento fueron obtenidos a través de una modelación inversa realizada por Bocanegra (2011). Las condiciones de contorno fueron definidas acorde a trabajos previos que plantean el modelo conceptual de esta zona de estudio (Bocanegra *et al.*, 1993; Martínez and Bocanegra 2002; Martínez *et al.*, 2014). El modelo fue calibrado hasta lograr un ajuste satisfactorio con los mapas piezométricos generados por OSSE entre los años 2005 - 2020.

Metodología

Como base para la implementación de este modelo numérico se tomaron los datos generados en el trabajo de Bocanegra (2011), en el cual se realizó un modelo de flujo utilizando técnicas de modelación inversa para su calibración mediante el programa Transin (Medina *et al.*, 1996). Los datos obtenidos del proceso de calibración de dicho modelo fueron utilizados como valores iniciales en este trabajo para generar un modelo base ajustado en régimen permanente y un segundo modelo en régimen transitorio. Luego, utilizando el modelo calibrado en régimen transitorio se realizaron simulaciones hasta el año 2016. Para realizar estas actividades fue seleccionado el código Modflow (Harbaugh 2005). Dicho código, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos está basado en la técnica de diferencias finitas. Para la gestión de datos a incluir en el modelo fue utilizada la interfaz gráfica Model Muse (Winston 2009).

Los límites del modelo se extendieron hacia el norte y hacia el sur de la ciudad de Mar del Plata, sobrepasando el modelo inicialmente planteado por Bocanegra (2011). Hacia el norte abarcando la albufera de Mar Chiquita y al sur incluyendo la cuenca del arroyo Chapadmalal, con un área continental total modelada de 6000 km². La discretización espacial consta de una grilla de 127 filas y 101 columnas, con celdas de 1000 m por 1000 m. Se utilizó un esquema monocapa de tipo libre, limitado por los mapas de superficie y de basamento hidrogeológico. Se adicionó un polígono de celdas inactivas correspondiente a la superficie fuera del dominio de modelación.

La topografía para este modelo fue generada a partir del Modelo Digital de Elevación puesto a disposición por el Instituto Geográfico Nacional Argentino (IGN). Por su parte, a la superficie del basamento se le adicionó información geoelectrica proveniente del estudio desarrollado por Massone *et al.* (2008), información litológica de 227 pozos suministrados por OSSE, datos de 58 pozos incluidos en la base de datos del Grupo de Hidrogeología de la Universidad Nacional de Mar del Plata y los afloramientos de la formación Balcarce, estos últimos cartografiados a partir de imágenes Landsat 8.

La profundidad del acuífero fue ajustada para que disminuya abruptamente al acercarse a las sierras, tratando de representar los límites verticales asociados a fallas estructurales que controlan los cuerpos serranos. Para esto, el sitio de afloramiento de las ortocuarcitas fue definido con un valor de espesor igual a cero. Se decidió tomar como profundidad máxima de modelación los 80 m, profundidad que es referenciada como promedio para el aprovechamiento del recurso en la ciudad (Mérida 2002). Todos estos datos fueron incluidos en un proceso geoestadístico de interpolación utilizando la extensión "Geostatistical analyst" (Johnston *et al.*, 2001) incluida en el programa ArcGIS 10.2 (ESRI 2013).

Para la construcción del modelo fue considerado un dominio bidimensional de un acuífero libre, poroso, homogéneo e isótropo. Las condiciones de borde en los sectores norte y sur se establecieron como de flujo nulo, coincidiendo en ambos casos con divisorias de aguas (Glok Galli *et al.*, 2014; Isla *et al.*, 2018). Las rocas del basamento fueron consideradas como un acuífero confinado de baja conductividad hidráulica. Para la línea de costa se fijó una condición de altura constante de 0 m s.n.m. El límite oeste se consideró con un flujo nulo, asociado a las zonas de cabecera de las diferentes cuencas incluidas. Por último, a los diferentes cursos de agua superficial se les otorgó una condición de contorno mixta, con una conductancia de 0.001 m/día.

Régimen estacionario: se construyó inicialmente un modelo en régimen estacionario para el año 1903, el cual fue utilizado como punto de partida de este análisis. Como fue mencionado, se utilizaron las zonas establecidas y calibradas por Bocanegra (2011) con diferentes conductividades hidráulicas y un valor de recarga general promedio para todo el dominio de 120 mm/año.

Régimen transitorio: este modelo fue implementado para la ventana temporal comprendida entre los años 1903 -2016. La recarga fue discriminada en zonas rurales, periserranas, zonas con riego y urbanas extendiendo en los casos que corresponde las áreas establecidas por Bocanegra (2011). Para la zona rural se asignó una recarga promedio del 11% de la precipitación, a la zona periserrana se le asoció un valor de recarga del 14% de la precipitación, mientras que para las zonas de riego el valor de recarga utilizado fue de 16% de la precipitación. Por su parte, para la recarga urbana, dicha autora desarrolló una expresión matemática enfocada en cuantificar la recarga urbana que, en función de la evolución espacio – temporal de la transformación de la zona rural en urbana, evalúa las pérdidas de las redes de agua y saneamiento, en los conductos pluviales, y la recarga por escurrimiento superficial y por pozos sépticos.

Recarga urbana	=	recarga por lluvia en la zona rural (aun no urbanizada)	+	recarga en zonas verdes urbanizadas	+	pérdidas de las redes de agua y saneamiento	+	pérdidas en los conductos pluviales	+	recarga por escurrimiento superficial y acumulación	+	recarga por pozos sépticos
----------------	---	---	---	-------------------------------------	---	---	---	-------------------------------------	---	---	---	----------------------------

Dicha expresión se formula de la siguiente manera:

$$RU = Ex \frac{SR}{EJ} + (Exfv + C \frac{TQ}{SU} + \alpha P) \frac{SU}{EJ} + \beta Esc \frac{SCV}{EJ} + \lambda \frac{PobCons}{EJ}$$

RU = recarga urbana (m/d)
 Ex = exceso del balance hídrico (m/d)
 EJ = ejido urbano = SR + SU (m²)
 SR = superficie rural (m²)
 SU = superficie urbanizada (m²)
 fv = espacio verde / superficie urbanizada
 C = coeficiente de pérdida en las redes sanitarias
 T = Tasa de distribución de población en la superficie urbanizada

Q = caudal de agua suministrada (m³/d)
 α = coeficiente de pérdida en la red pluvial
 P = precipitación (m/d)
 β = coeficiente de escurrimiento
 Esc = escurrimiento superficial (m/d)
 SCV = superficie de la cuenca vertiente (m²)
 λ = tasa de población sin servicios sanitarios
 Pob = cantidad de población (hab)
 Cons = consumo promedio (m³/hab.d)

Los valores de recarga utilizados y su variación en el tiempo pueden observarse en la Figura 7. En esta misma figura fue incluida la información de los caudales de extracción entre los años 1913 y 2016, datos que fueron suministrados por la empresa OSSE.

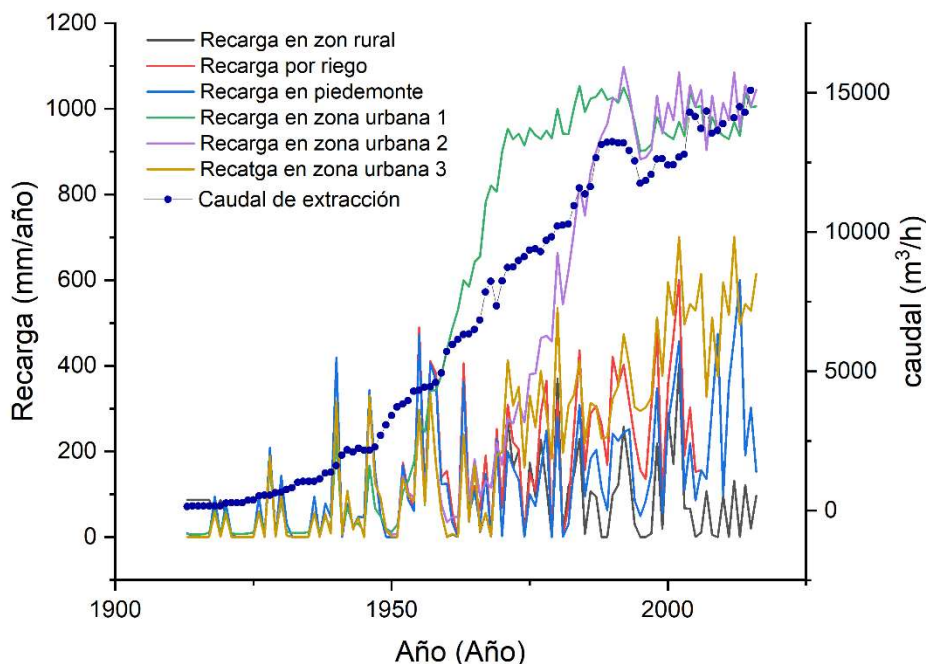


Figura 7. Variación espacial de la recarga y evolución de caudales de extracción.

RESULTADOS

El modelo en régimen estacionario satisface las consideraciones del modelo conceptual del área de estudio (Figura 8). En la mayor parte de la zona se evidencia un flujo regional sudoeste - noroeste, partiendo desde las sierras del sistema de Tandil hacia el océano. Según esta piezometría, en los arroyos y humedales predomina un comportamiento efluente, con una recarga regional en los sectores cercanos a las sierras de Tandilia y una descarga general en el océano. Para la zona de Mar del Plata, en la vertiente sur del sistema de Tandilia, se evidencia un aumento en el gradiente hidráulico y un cambio en la dirección de los flujos regionales a una dirección noroeste - sureste. En cuanto al modelo transitorio, se utilizaron todos los niveles de monitoreo a los que se tuvo acceso para evaluar su respuesta, en total se utilizaron 2207 datos de nivel. Dichos niveles, medidos en campo, fueron comparados con los datos de nivel generados por el modelo. Los errores residuales variaron entre los -31 m y 25 m (Figura 9). El 67% de estos errores se encuentran en el rango de ± 10 m, y el 53% de los mismos en el rango de ± 5 m. Si se toma un valor medio de espesor del acuífero de 80 m, este valor de error residual resulta aceptable a los objetivos del modelo. Los mayores errores detectados pueden estar siendo influenciados por la resolución espacial utilizada, lo cual puede afectar especialmente los valores obtenidos en zonas donde el gradiente hidráulico es mayor debido al incremento gradual del bombeo.

La respuesta del modelo en régimen transitorio y su comparación con los datos de monitoreo obtenidos en campo para el año 2016 se muestra en la Figura 10; en este caso se utilizaron en total 224 observaciones. Este análisis arrojó un valor residual medio de -3.59 m, siendo más frecuentes los errores en el rango de ± 5 m (63%), con un coeficiente de correlación entre los niveles observados y calculados de 0.96. Estos resultados dan un buen grado de confiabilidad a la respuesta del acuífero simulado en cumplimiento del objetivo planteado. El mapa piezométrico obtenido muestra valores con un buen ajuste a los mapas generados por la empresa de obras sanitarias de la ciudad, obteniendo niveles mínimos de -15 m s.n.m. coincidentes con las zonas de ubicación de la batería de pozos que actualmente abastecen la ciudad.

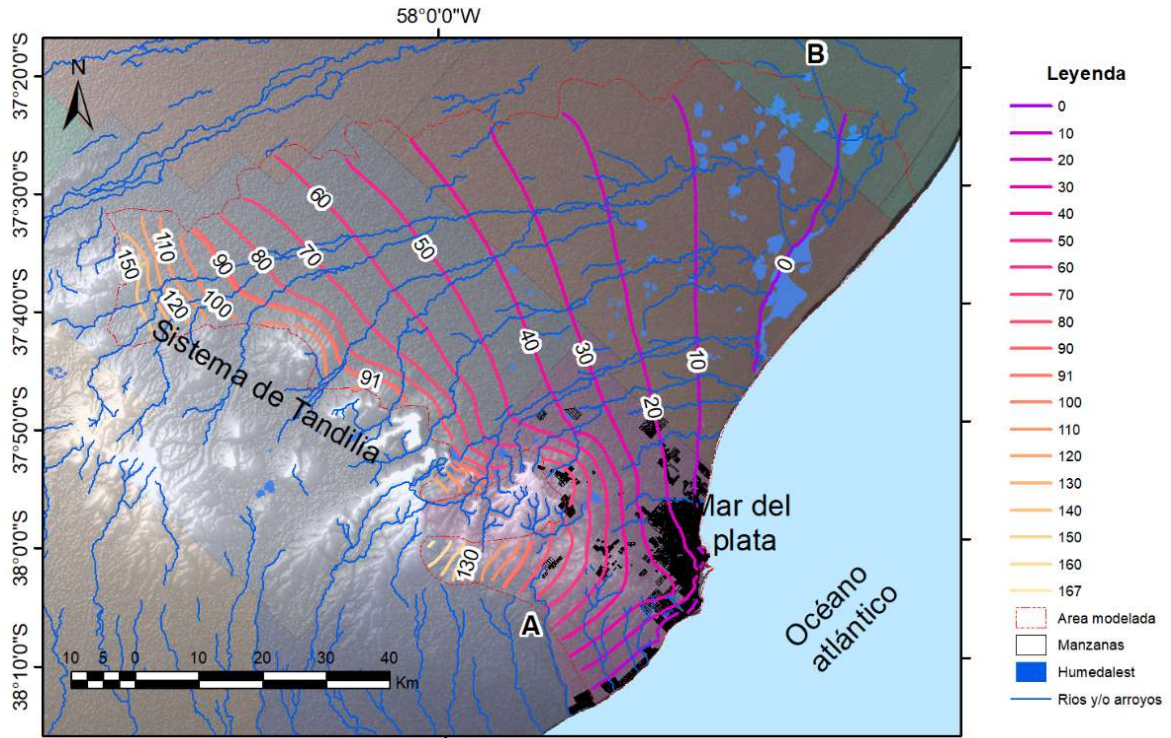


Figura 8. Mapa piezométrico modelado para el año 1903.

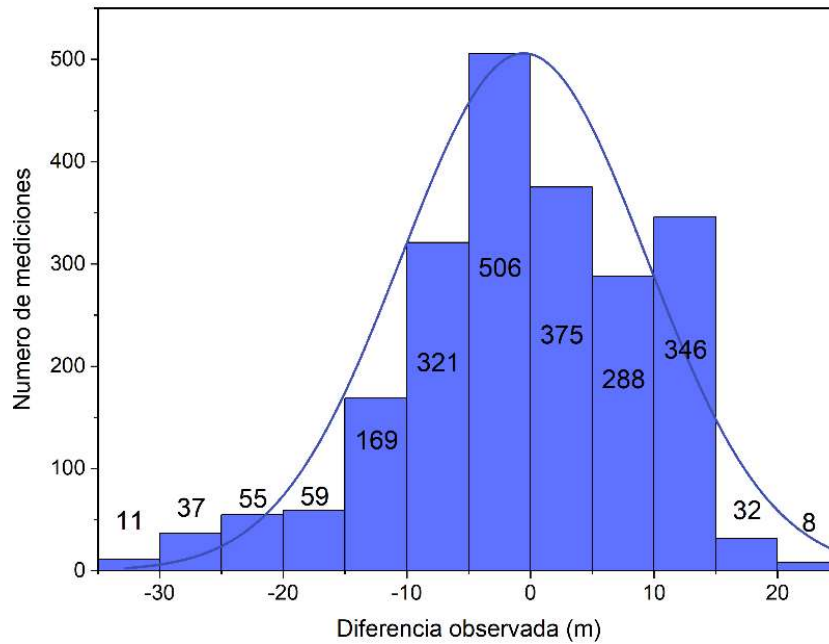


Figura 9. Distribución de errores residuales calculados en toda la extensión temporal del modelo.

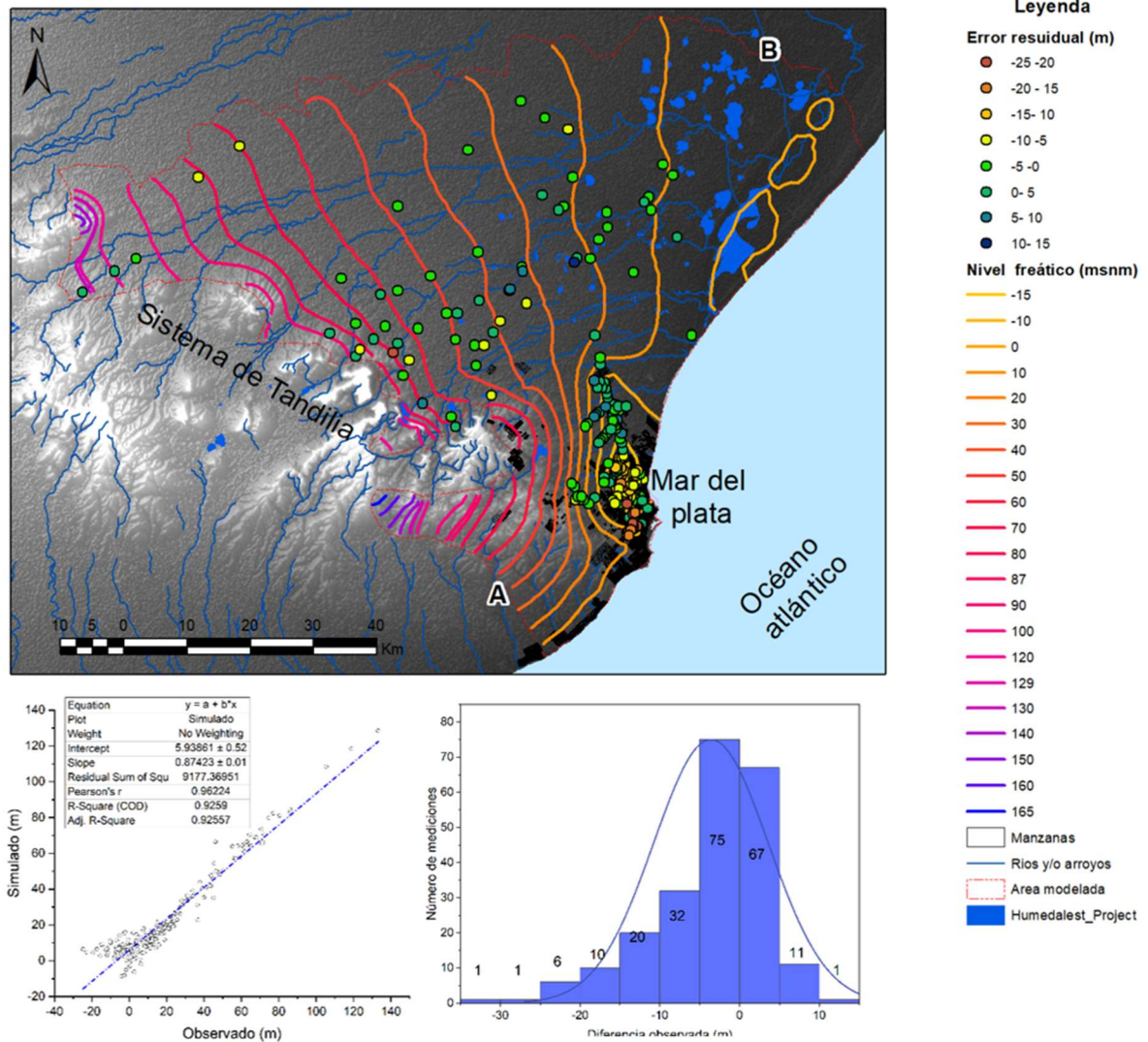


Figura 10. Mapa piezométrico modelado para el año 2016 y ajuste de niveles piezométricos.

CONCLUSIONES

La actualización del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero de Mar del Plata ha permitido mejorar el conocimiento en relación con el marco físico y a las acciones naturales y antrópicas que determinan su comportamiento.

El sistema acuífero ha sido considerado siempre homogéneo no obstante presentar marcadas heterogeneidades locales en su conjunto y a escala regional. Se han podido caracterizar, a partir de perfiles litológicos, diferentes ambientes hidrogeológicos y realizar una zonificación espacial.

La cuantificación de la recarga urbana que comprende la evolución de las principales entradas al acuífero de origen natural y antrópico que pueden tener lugar en un ámbito rural sometido a transformación en periurbano y urbano, constituyó un método adecuado para asignar funciones temporales de recarga urbana al modelo numérico.

Se ha efectuado la construcción y calibración del modelo numérico 2D de flujo en régimen estacionario y transitorio. El modelo implementado resulta coherente con el modelo conceptual actualizado del acuífero, en el que se ha incorporado la zonificación espacial de

los parámetros de flujo en los distintos ambientes hidrogeológicos y la zonificación espacial y las funciones temporales de entrada al sistema.

El modelo numérico considera los caudales de extracción que utiliza Obras Sanitarias para abastecimiento urbano y reproduce espacial y temporalmente con un buen ajuste los niveles piezométricos observados.

Los resultados del modelo numérico de flujo permitieron confirmar el modelo conceptual propuesto y reproducir a través de la simulación las estrategias de gestión desde los comienzos de explotación hasta la actualidad.

Se espera que este modelo pueda ser usado como herramienta de gestión de la cantidad y de la calidad de los recursos hídricos subterráneos y permita optimizar los esquemas de extracción y la futura expansión de las áreas de captación, además de brindar una herramienta que permita considerar diferentes alternativas para incrementar la captación de agua para abastecimiento estableciendo posibles respuestas del acuífero a nuevos regímenes espaciales y temporales de explotación.

BIBLIOGRAFÍA

Appelo, C.A. y Postma D. (1993). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema / Rotterdam- Brookfield.

Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier. New York.

Bocanegra, E. (2011). Desarrollo de herramientas hidrogeoquímicas y numéricas aplicadas a la evaluación de la explotación del acuífero de Mar del Plata (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

Bocanegra, E., Cardoso Da Silva Jr, G., Custodio, E., Manzano, M., Montenegro, S. (2010). State of knowledge of coastal aquifer management in South America. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 261-267 DOI: 10.1007/s10040-009-0520-5.

Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. y Cionchi, J. (1993). Exploitation effect and salt water intrusion in the Mar del Plata aquifer, Argentina. In: E. Custodio y A. Galofre (eds) *Study and modelling of saltwater intrusion into Aquifers*, Barcelona, Spain (177-191 pp). Foundation International Center for Groundwater Hydrology.

Bocanegra, E.M. (2005). Intensive use of groundwater in Latin America. En: Martínez-Cortina, Sánchez Vila, Sauquillo, Capilla (eds), *Groundwater Intensive Use. Chapter Cases histories* (pp. 167-176). Balkema, London.

Bocanegra, E.M. y Custodio, E. (1994). Utilización de acuíferos costeros para abastecimiento. Dos casos de estudio: Mar del Plata (Pcia. de Buenos Aires, Argentina) y Barcelona (Cataluña, España). *Ingeniería del Agua*, 1 (4), 49-78.

Bocanegra, E.M., Cionchi, J.L., Fasano, J.L., Osterrieth, M.L. y Schnack, E.J. (1989). Geología ambiental del área urbana marplatense, Provincia de Buenos Aires. Caracterización preliminar. *I Jornadas Geológicas Bonaerenses*, Actas: pp 663-682. Tandil, Argentina.

Bocanegra, E.M., Martínez, D.E., Massone, H.E. y Cionchi, J.L. (1993). Exploitation effect and salt water intrusion in the Mar del Plata aquifer, Argentina. *Study and modelling of salt water intrusion into aquifer, CIMNE-UPC*, 177-191.

Bocanegra, E.M. (1994). Modelación hidrogeoquímica de los procesos de salinización del acuífero de Mar del Plata, Argentina. En: Bocanegra E, Rapaccini (eds) *Temas actuales de Hidrología Subterránea*, UNMDP-CFI. pp 349-360.

Cionchi, J.L. (1994). Estado del cono de depresión en la zona de explotación de OSSE. Obras Sanitarias Mar del Plata SE, informe técnico inédito. Mar del Plata, 19 pp.

Cionchi, J.L. (2004). Proyecto para la recuperación de áreas afectadas por la intrusión salina en el sector céntrico de la ciudad de Mar del Plata.- Cuencas A° Las Chacras-El Tigre. Informe técnico inédito. OSSE, Mar del Plata, 10 pp.

Cionchi, J.L. (2007). Perfiles litológicos en el Partido de General Pueyrredón. Informe técnico inédito. OSSE, Mar del Plata, 6 pp.

Cionchi, J.L. y Redin, I. (2004). La contaminación del agua subterránea producida por las deficiencias constructivas en las perforaciones. Informe RH 1/2004. Inédito. OSSE., Mar del Plata, 22 pp. https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-03_01-01-39104019.pdf

Cionchi, J.L., Mérida, L.A. y Redin, R.I. (2000). La explotación racional de los recursos hídricos subterráneos en el Partido de Gral. Pueyrredón. El caso de Obras Sanitarias S.E. OSSE, Informe Inédito. Mar del Plata, 72 pp. http://www.osmgp.gov.ar/osse/wp-content/uploads/2019/12/la_explotacion_racional_del_agua.pdf

Custodio, E. (2004) Hidrogeología urbana: una nueva rama de la ciencia hidrogeológica. *Boletín Geológico y Minero*, 115, 283-288.

Custodio, E. y Llamas, J.R. (1976). Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona.

Custodio, E. y Llamas, J.R. (1983). Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona.

Dalla Salda, L. y Iñiguez A. (1979). La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. *VII Congreso Geológico Argentino*, volumen 1, pp. 539-550. Buenos Aires, Argentina.

Domenico, P.A., Schwartz, F.W. (1990). Physical and chemical hydrology. New York, John Wiley and Sons, Inc.

ESRI. (2013). ArcGIS 10.2 for desktop. Environmental Systems Research Institute Redlands (CA).

Foster, S., Lawrence, A. y Morris B. (1998). Groundwater in Urban Development: Assessing Management Needs and Formulating Policy Strategies. World Bank Technical Paper N° 390. Washington DC: The World Bank.

Freeze, A.R. y Cherry, J.H. (1978). Ground Water. England. Prentice Hall, Englewood.

Glok Galli, M., Martínez, D. E., Kruse, E. E., Grondona S. I. y Lima M. L. (2014). Hydrochemical and isotopic characterization of the hydrological budget of a MAB Reserve: Mar Chiquita lagoon, province of Buenos Aires, Argentina. *Environmental earth sciences*, 72(8), 2821-2835 doi:10.1007/s12665-014-3187-8.

Groeber, P. (1954). Geología e hidrogeología de Mar del Plata relacionada con el problema de provision de agua corriente a la zona urbana. *Revista del Museo Municipal de Mar del Plata*, 1(2), 5-25.

Guiger, N. y Franz, T. (1996). VISUAL MODFLOW. The integrated Modeling Environment for MODFLOW and MODPATH. Versión 2.00. User's Manual.

Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA.

Hernández, M., Fasano, J.L. y Bocanegra, E. (1991). Efectos de la sobreexplotación del acuífero cuaternario de Mar del Plata, Argentina. *XXIII International Congress Aquifer Overexploitation, Proceedings*, 1, pp 431-435. Tenerife, España.

Hernández, M., Fasano, J.L., Bocanegra, E.M. (1992). Overexploitation effects on the aquifer of Mar del Plata, Argentina. Marine intrusion and ground water decline. *Selected Papers on Aquifer Overexploitation. I Congreso Nacional de Hidrogeología*, pp. 433-444. Bahía Blanca, Argentina.

Hernández, M., Fasano, J.L. y Bocanegra, E.M. (1989). Prevención de riesgos en la recuperación de niveles piezométricos en áreas urbanas de Argentina. *Segunda Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. ALSHUD-UBA-IDRC.Actas*, pp 130-138. Buenos Aires, Argentina.

Isla, F.I., Londoño O.M.Q. y Cortizo L. C. (2018). Groundwater characteristics within loessic deposits: the coastal springs of Los Acantilados, Mar del Plata, Argentina. *Environmental earth sciences*, 77(17),610.

Johnston, K., J. M. Ver Hoef, K. Krivoruchko & N. Lucas, 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst, vol 380. Esri Redlands.

Marchese, H. y Di Paola, E. (1975). Reinterpretación estratigráfica de la perforación de Punta Mogotes I, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 30(1),44-52.

Martínez, D.E., Massone, H. E., y Bocanegra, E. M. (2005). Groundwater salinization in the harbour area graben in Mar del Plata, Argentina. Hydrogeochemical perspective. *IGME, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 15, 585-595.

Martínez, D. y Bocanegra, E. (2002). Hydrogeochemistry and cation-exchange processes in the coastal aquifer of Mar Del Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 10(3),393-408 doi:10.1007/s10040-002-0195-7.

Martínez, D., Moschione, E., Bocanegra, E., Galli, M. G y Aravena, R. (2014). Distribution and origin of nitrate in groundwater in an urban and suburban aquifer in Mar del Plata, Argentina. *Environmental earth sciences*, 72(6), 1877-1886.

Martínez, D.E., Bocanegra, E.M., Cionchi, J.L. (1996). Modelación hidrogeoquímica de procesos de mezcla. Su aplicación a casos de estudio en el acuífero de Mar del Plata. *Serie Correlación Geológica* , 11, 69-80.

Martínez, D.E., Bocanegra, E.M. y Manzano, M. (2000). La modelación hidrogeoquímica como herramienta en estudios hidrogeológicos. *Boletín Geológico y Minero. Revista de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*, 111(4), 83-97.

Martínez, D.E., Massone, H.E. y Bocanegra, E.M. (2005). Groundwater salinization in the harbour area graben in Mar del Plata, Argentina. *Hydrogeochemical perspective*. IGME. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 15, 585-595. ISBN: 84-7840-588-7.

Martínez, G.A. (1997) Geomorphology and Late Cenozoic geology of the southern side of Tandilia Range, Buenos Aires province, Argentina. International Symposium Geomatics in the Era of Radarsat, Ottawa, Canadá. Expanded Abstracts: 482-483 pp.

Martínez, G.A. (1998). Identificación de Paisajes Relictuales del Pleistoceno Tardío-Holoceno con Imágenes Ópticas y de Radar en el Sudeste de la Provincia de Bs. As. V Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Actas Volumen 1, pp. 103-109. Mar del Plata, Argentina.

Massone, H., Martínez, D., Quiroz Londoño, O., Tomas, M., Ferrante, A., Bernasconi, V. y Farena M. (2008). Prospección geoelectrica con fines hidrogeológicos en la cuenca Sur del Partido de General Pueyrredón, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Asociación Latinoamericana Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD)*, 6,57-68.

Massone, H.E., Martínez, D.E., Cionchi, J.L. y Bocanegra, E.M. (1994). Procesos de contaminación del acuífero de Mar del Plata, Argentina: diagnóstico y pautas de prevención y control. *II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Volumen 1, pp. 81-95. Santiago, Chile.

Mauriño, V., Varde, O. y Scanavino, R. (1981). Investigaciones geológicas y geotécnicas realizadas para el proyecto de una central hidroeléctrica de acumulación por bombeo. *VIII Congreso Geológico Argentino*, pp.45-66.

Medina, A., Galarza, G. y Carrera, J. (1996). Transin-II. Fortran code for solving the coupled flow and transport inverse problem in saturated conditions. En el Berrocal Project. Topical Report, 4(16).

Mérida, L. (2002). La evolución de la intrusión salina en el acuífero Marplatense. Ejemplo de una gestión sustentable. *XXXII IAH and VI ALHSUD Congress, Aguas Subterráneas y desarrollo humano*, 841-850 pp. Rosario, Argentina.

Moujabber, M.E., Samra, B.B., Darwish, T., y Atallah, T. (2006). Comparison of different indicators for groundwater contamination by seawater intrusion on the Lebanese coast. *Water Resources Management*, 20(2), 161-180.

Quiroz Londoño, O.M., Romanelli A., Martínez D.E. y Massone H. E. (2020). Water exchange processes estimation in a temperate shallow lake based on water stable isotope analysis. *Isotopes in environmental and health studies*, 56(5-6), 465-479. DOI: 10.1080/10256016.2020.1803857.

Ruiz Huidobro, O. y Tofalo, O.R. (1975) La intrusión de agua de mar en acuíferos litorales. Su control en Mar del Plata (República Argentina). *VI Congreso Geológico Argentino*, Actas, pp. 515-523. Buenos Aires, Argentina.

Ruiz Huidobro, O.J. (1971). La intrusión de agua de mar en el acuífero de Mar del Plata. 1° Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica. Volumen 3, pp. 845-858. Madrid/Lisboa, España

Sala, J. M. (1975). Recursos hídricos (especial mención de las aguas subterráneas). En Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires. VI Congreso Geológico Argentino, relatorio, pp. 169-193. Bahía Blanca, Argentina.

Sala, J.M., Hernández, M., González, N., Kruse, E, y Rojo, A. (1980). Investigación geohidrológica aplicada en el área de Mar del Plata. Convenio Obras Sanitarias de la Nación - Universidad Nacional de La Plata. V Tomos (inédito).

Shi, L., y Jiao, J. J. (2014). Seawater intrusion and coastal aquifer management in China: a review. *Environmental Earth Sciences*, 72(8), 2811-2819.

Teruggi, M. E. (1957). The nature and origin of Argentine loess. *Journal of Sedimentary Research* 27(3),322-332.

Teruggi, M. y Kilmurray, J. (1975). Tandilia. En: Relatorio Geología de la provincia de Buenos Aires, VI Congreso Geológico Argentino, pp. 55-77. Bahía Blanca, Argentina.

Teruggi, M., Mauriño, V., Limousin, T. y Schauer, O. (1962). Geología de la porción oriental de las Sierras de Tandil. Primeras Jornadas Geológicas Argentinas, 2,359-372. San Juan, Argentina.

Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical review*, 38(1),55-94. doi:10.2307/210739.

Venâncio, C., Ribeiro, R., y Lopes, I. (2022). Seawater intrusion: An appraisal of taxa at most risk and safe salinity levels. *Biological Reviews*, 97(1), 361-382.

Voss, C.I. (1984). SUTRA -Saturated-Unsaturated TRANsport--A Finite-Element Simulation Model for Saturated-Unsaturated Fluid-Density-Dependent Groundwater Flow with Energy Transport or Chemically Reactive Single-Species Solute Transport. *U.S. GEOLOGICAL SURVEY Water-Resources Investigations Report* 84 4369.

Voss, C.I. y Souza, W.R. (1987). Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone. *Water resources research*, 23, 1851- 1866.

Winston, R. B. (2009). ModelMuse: a graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. *US Geological Survey*. Reston, VA.

Zárate, M. y Fasano, J. (1984). Características de la sedimentación pleistocena en la zona de Chapadmalal, Provincia de Buenos Aires: significado de los paleosuelos y costras calcáreas. *Actas del Noveno Congreso Geológico Argentino*, pp. 57-75. Bariloche, Argentina.

Trabajo recibido el 21/06/2022 y aprobado para su publicación el 29/06/2022.

Cómo citar este artículo

Bocanegra, E.; Quiroz Londoño, O.M.; Grondona, S.; Martínez, D. (2022). Acuíferos costeros explotados intensamente. Modelo conceptual, respuesta hidrodinámica y simulación numérica del acuífero de Mar de Plata, *Revista Argentina de Hidrogeología*, 1:59-78

AUSPICIARON ESTA EDICIÓN

