



**EL AGUA SUBTERRÁNEA:
“RECURSO SIN FRONTERAS”**

HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

VOLUMEN I

EDITORES

**Rodolfo GARCÍA, Eduardo CASTRO
Miguel AUGE, Carlos FALCÓN
Mónica BLARASÍN**



Universidad Nacional de Salta



UNLPam
Universidad Nacional de La Pampa



El Agua Subterránea: Recurso sin Fronteras: Hidrogeología Regional. Volumen I.
Rodolfo Fernando García [et al.]. Primera Edición. 2018.

Editorial de la Universidad Nacional de Salta. Salta. República Argentina. Avenida
Bolivia 5150, Salta Capital (4400).

CD-ROM, DOCX

ISBN 978-987-633-538-6

1. Agua Subterránea. 2. Hidrogeología. 3. Geología. I. García, Rodolfo Fernando
CDD 551.48

Diseño de tapa y diagramación de interior: María Dihel / Nexo di Nápoli

MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO COSTERO MEDANOSO. CASO DE ESTUDIO: PINAMAR

Rodrigues Capitulo, L. ^{(1) (2)} y Kruse E. ^{(1) (2)}

⁽¹⁾ Facultad de Ciencias Naturales y Museo. CEIDE, calle 64 n° 3. La Plata. Buenos Aires. Argentina. Teléfono (0221) 4249049. leandrorodriguescapitulo@gmail.com

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de La Plata.

Resumen

El agua subterránea en zonas costeras presenta ciertas características particulares desde el punto de vista de la génesis y el funcionamiento de los espacios naturales litorales con ellos relacionados. La región estudiada se enmarca en dichos aspectos y se caracteriza por un fuerte crecimiento demográfico, lo cual significa requerimientos crecientes de agua potable. El objetivo de este trabajo se centró en la generación de un modelo conceptual de funcionamiento geohidrológico de un sector costero acotado al cordón costero en el Partido de Pinamar. La metodología empleada consistió en la exploración y monitoreo sistemático del acuífero costero para lo cual fue necesario el empleo de técnicas tradicionales y específicas a partir de las cuales fue posible identificar aquellos aspectos que resultan del comportamiento natural de aquellos que son producto de la actividad antrópica. Los resultados obtenidos permitieron plantear un modelo conceptual para el funcionamiento del sistema geohidrológico desarrollado en la parte superior de la secuencia sedimentaria hasta una profundidad del orden de 50 m. Se identificaron 5 unidades las cuales reflejan la evolución de un área costera asociada a procesos transgresivo-regresivos que se caracterizan por una sedimentación con fuertes variaciones laterales tanto en espesores como en su composición litológica. Resulta imprescindible un conocimiento detallado del ciclo hidrológico en las áreas costeras, como es el caso del Partido de Pinamar, con el fin de desarrollar y mejorar la generación de información, lo cual posibilitará validar modelos de funcionamiento más completos que permitan definir pautas para el manejo sustentable en dicha región.

Palabras clave: Pinamar – Aguas subterráneas – Cordón costero

Abstract

Groundwater in coastal areas presents certain particular characteristics from the point of view of the genesis and functioning of the coastal natural spaces with which they are related. The region studied is framed in these aspects and is characterized by a strong population growth, which means increasing requirements for drinking water. The objective of this work focused on the generation of a conceptual model of the geohydrological functioning of a coastal sector bounded to the sand dune barrier at the Pinamar district. The methodology used consisted in the exploration and systematic monitoring of the coastal aquifer, for which it was necessary to use traditional and specific techniques from which it was possible to identify those aspects that result from the natural behavior of those that are the product of anthropic activity. The results obtained allowed us to propose a conceptual model for the operation of the geohydrological system developed in the upper part of the sedimentary sequence up to a depth of 50 m. Five units were identified, which reflect the evolution of a coastal area associated with transgressive-regressive processes that are characterized by a sedimentation with strong lateral variations both in thickness and their lithological composition. A detailed knowledge of the hydrological cycle in coastal areas is essential, as is the case of the Partido de Pinamar, in order to develop and improve the generation of information, which will enable the validation of more complete operating models that allow defining guidelines for the management sustainable in said region.

Keywords: Pinamar – Groundwater – Sand dune barrier

INTRODUCCIÓN

Las zonas litorales han experimentado presiones en sus valores ambientales como resultado del desarrollo poblacional. Este desarrollo ha sido posible, entre otros factores, por la existencia de recursos hídricos, ya sea a través de la utilización del agua superficial o del agua subterránea. El crecimiento económico durante el último siglo ha conllevado una

explotación agresiva de estos recursos. Como resultado, las reservas de agua han disminuido y su calidad se ha deteriorado, afectando tanto a su disponibilidad para los usos humanos como para la preservación de los ecosistemas (Kruse y Mas Pla, 2009).

El agua subterránea en las zonas costeras presenta características particulares desde el punto de vista de la génesis y el funcionamiento de los espacios naturales litorales con ellos relacionados. La gestión eficaz de dichos espacios naturales requiere conocer con detalle la geometría, origen y funcionamiento de los acuíferos (Manzano, 2002). En general dichos acuíferos costeros se caracterizan por una alta vulnerabilidad (White y Falkand, 2010) y las modificaciones que produce la actividad antrópica en la dinámica del agua subterránea influye en las reservas y calidad química del agua (Schneider y Kruse, 2005).

En Sudamérica presentan algunos rasgos comunes, como ser la explotación intensiva, falta de estudios de caracterización que apoyen la planificación y gestión de los recursos, falta de redes de observación y la necesidad de crear una conciencia sobre la cuestión en la sociedad y su implicación en la planificación del recurso y en los programas de actuaciones de gestión (Bocanegra et al., 2010). Los problemas de calidad y cantidad que aparecen en áreas altamente pobladas que están asociadas a acuíferos costeros sudamericanos, indican un desarrollo no sustentable de las aguas subterráneas.

La región estudiada (costa oriental de la Provincia de Buenos Aires) se enmarca en dichos aspectos y se caracteriza por un fuerte crecimiento demográfico, lo cual significa requerimientos crecientes de agua potable asociados a los procesos de urbanización y expansión de las actividades del hombre. Se estima que el Partido de Pinamar cuenta con una población estable de 25.415 habitantes en el censo de 2010, y que, a su vez en la época estival, como consecuencia de la presión turística, supera los 500.000 habitantes.

En el sector oriental de la provincia de Buenos Aires, la implantación de áreas forestadas disminuye los excesos de agua como consecuencia de una mayor evapotranspiración, afectando así las posibilidades de alimentación del acuífero freático. La eliminación de dunas influye en el régimen hidrodinámico natural del agua subterránea, ya que decrece la posibilidad de infiltración de las precipitaciones y se restringen las áreas de recarga y el almacenamiento de agua dulce, al tiempo que puede contribuir al proceso erosivo en la costa (Pousa et al., 2007).

El objetivo de este trabajo se centró en la formulación de un modelo conceptual de funcionamiento geohidrológico de un sector costero oriental en el Partido de Pinamar.

AREA DE ESTUDIO

En el borde oriental de la Provincia de Buenos Aires se ubica el Partido de Pinamar (37° 6' 36.66" Latitud Sur; 56° 52' 17.83" Longitud W) (Figura 1). Con una superficie de 66,2 km² se trata de un polígono de forma rectangular con su eje mayor ubicado en dirección sudoeste - noreste, que limita al oeste con el Partido de General Juan de Madariaga, al norte con el Partido de La Costa, al sur con el de Villa Gesell, y al este con el Mar Argentino.

El área de estudio corresponde desde un punto de vista hidrogeológico a la región "costera" (González, 2005). El clima de la región, de acuerdo a la clasificación Thornthwaite (1948), es B2 B'2 r a', mesotermal, templado frío, con nulo a pequeño déficit de agua y concentración estival de la eficiencia térmica menor del 48%. El valor medio para las precipitaciones es de 900 mm, mientras que para las temperaturas el mismo es de 14,5 °C.

El sector analizado se erige entre la Llanura deprimida y el océano atlántico y corresponde al sector que geológicamente es conocido como Cordón Costero (Parker y Violante, 1989). El mismo posee entre 2 y 4 km de ancho, presenta su mejor expresión entre Villa Gesell y Punta Médanos y disminuye paulatinamente hacia el norte y sur hasta desaparecer. Se trata de una unidad arenosa que se compone de dos subunidades menores comúnmente denominadas como Playa y Médanos. Las playas son rectilíneas y tienen un ancho que oscila entre los 50 y los 150 m. Presentan pendientes suaves cubiertas en su mayor parte por arenas finas a medianas y excepcionalmente gruesas. Estas playas pertenecen por sus características al tipo de costa de construcción (sin barranca y con playa arenosa), como las clasificara Teruggi (1959).



Figura 1. Área de estudio. Límites del Partido de Pinamar y sus localidades.

METODOLOGIA

Se realizó una recopilación de antecedentes bibliográficos nacionales e internacionales referente a acuíferos costeros.

La caracterización climática se basó en datos mensuales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Además, se instalaron dos estaciones meteorológicas en Pinamar y Cariló obteniéndose registros diarios de lluvias, temperatura y humedad. Para la estimación de los excesos hídricos, se utilizó un balance hidrológico de paso diario para el período 1997-2010. Los datos de ET₀ media diaria de acuerdo a FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998) se derivaron de los 12 valores mensuales (Falasca y Forte Lay 2006).

Se confeccionó un mapa topográfico del partido de Pinamar, acotándose 110 puntos acotados mediante un nivel óptico y 182 con un equipo de GPS diferencial. Se realizaron 47 perforaciones exploratorias (Figura 2) con profundidades que oscilaron entre los 10 y los 40 m. A partir de estas perforaciones se construyeron 10 perfiles geológicos, 3 de ellos paralelos a la línea de costa mientras que los restantes en forma perpendicular. Un modelo geológico 3D se realizó a partir el software Petrel-Schlumberger (v.2014.05) empleando los módulos "Geoscience Core", "Well Correlation", "Data Analysis" y "Facies Modeling".

Se instaló una red de monitoreo compuesta por 67 pozos (Figura 2) que permitieron obtener datos mensuales, diarios y horarios de niveles hidráulicos como así también la extracción de muestras para análisis fisico-químicos e isotópicos. De este conjunto, 22 perforaciones fueron destinadas a la determinación de parámetros hidráulicos mediante la ejecución de ensayos de bombeo. Diez perforaciones se asignaron al estudio de la relación agua dulce-salobre y dulce-salina en los límites occidental y oriental del cordón costero respectivamente y a la determinación del espesor acuífero en la porción central. Se llevó a cabo la medición sistemática de niveles de agua subterránea durante el periodo septiembre de 2011 - marzo de 2015. Adicionalmente se instalaron registradores continuos de nivel y temperatura de agua subterránea a partir de los cuales se obtuvieron datos diarios y horarios.

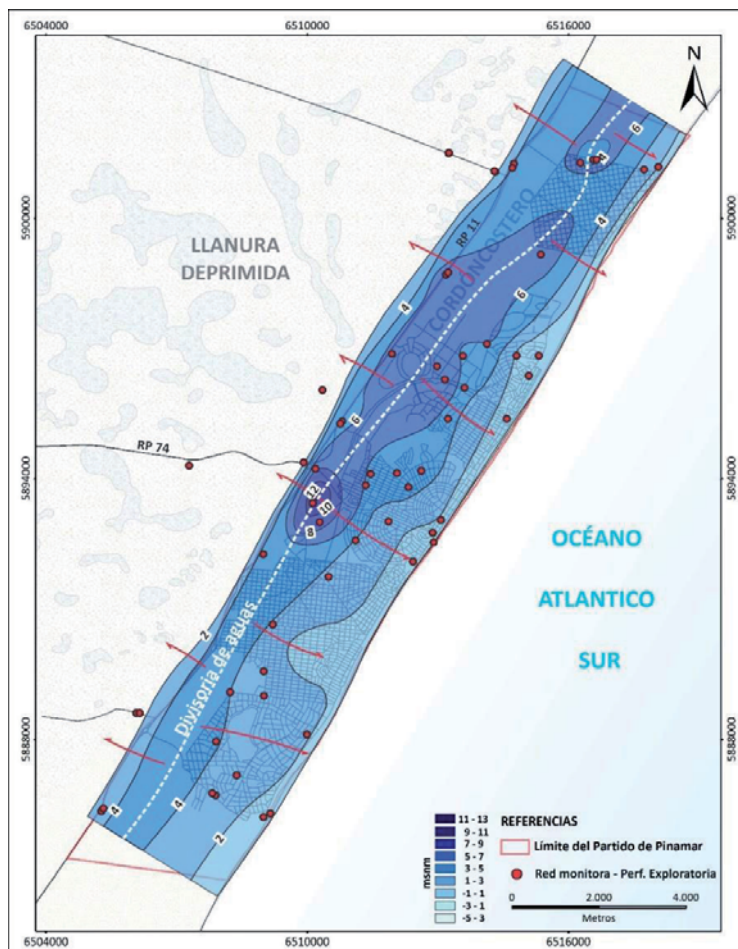


Figura 2. Ubicación de perforaciones de monitoreo/exploratorias. Mapa de flujo subterráneo.

La caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas se realizó en base a tres muestreos (noviembre de 2011, marzo de 2012 y noviembre de 2014). Se realizaron determinaciones de HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^+ , K^+ , NO_3^- , NO_2^- , SDT, pH, CE, Fe total, Mn^{2+} , As, F^- y Br^- . Adicionalmente se llevaron a cabo 6 campañas de medición de conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea durante septiembre de 2011, marzo y diciembre de 2012, marzo de 2013 y marzo y noviembre de 2014. Se realizaron perfilajes de conductividad eléctrica sobre los sondeos profundos

La elaboración hidrodinámica se basó en los datos de nivel de agua subterránea mensuales (septiembre de 2011- marzo de 2015).

La información obtenida se integró a un Sistema de Información Geográfica (GIS), se utilizó el software Arcmap 10.2 (ESRI). La base para la integración fue una imagen satelital adquirida a partir del servidor GLFC - ESDI (Global Land Cover Facility - Earth Science Data Interface) Landsat 7 TM, Adicionalmente se utilizaron imágenes de adquisición gratuita obtenidas a partir del programa Google Earth

Los niveles de información del SIG consistieron en los límites de partido; localidades; ejido urbano (Rutas y calles); manzanas y parcelas existentes; sistema de saneamiento (zona servida, cloacas, sistema de impulsión, llaves exclusas); planta de tratamiento de efluentes líquidos cloacales; sistema de abastecimiento de agua potable (perforaciones, sistema de conducción); red monitorea del acuífero subterráneo; perforaciones de reconocimiento geológico antecedentes y propias; imágenes satelitales (Landsat 7 TM y Google); cartas topográficas; carta de suelos (INTA) y coberturas entre otros.

RESULTADOS

Se planteó un modelo conceptual del sistema geohidrológico (Figura 3), que se desarrolla en la parte superior de la secuencia sedimentaria, incluyendo al “cordón costero” hasta una profundidad del orden de 50 m. Para simplificar el sistema y presentar una aplicación directa para la resolución de los problemas hidrogeológicos se empleó el término de “hidrofacies” y de este modo lograr una aplicación hidrogeológica a las unidades geológicas. El término hidrofacies ha sido empleado en el sentido de Anderson (1989), que lo define como una unidad sedimentaria homogénea pero no necesariamente isotrópica, que, formada bajo condiciones particulares conduce a un comportamiento hidrogeológico particular.

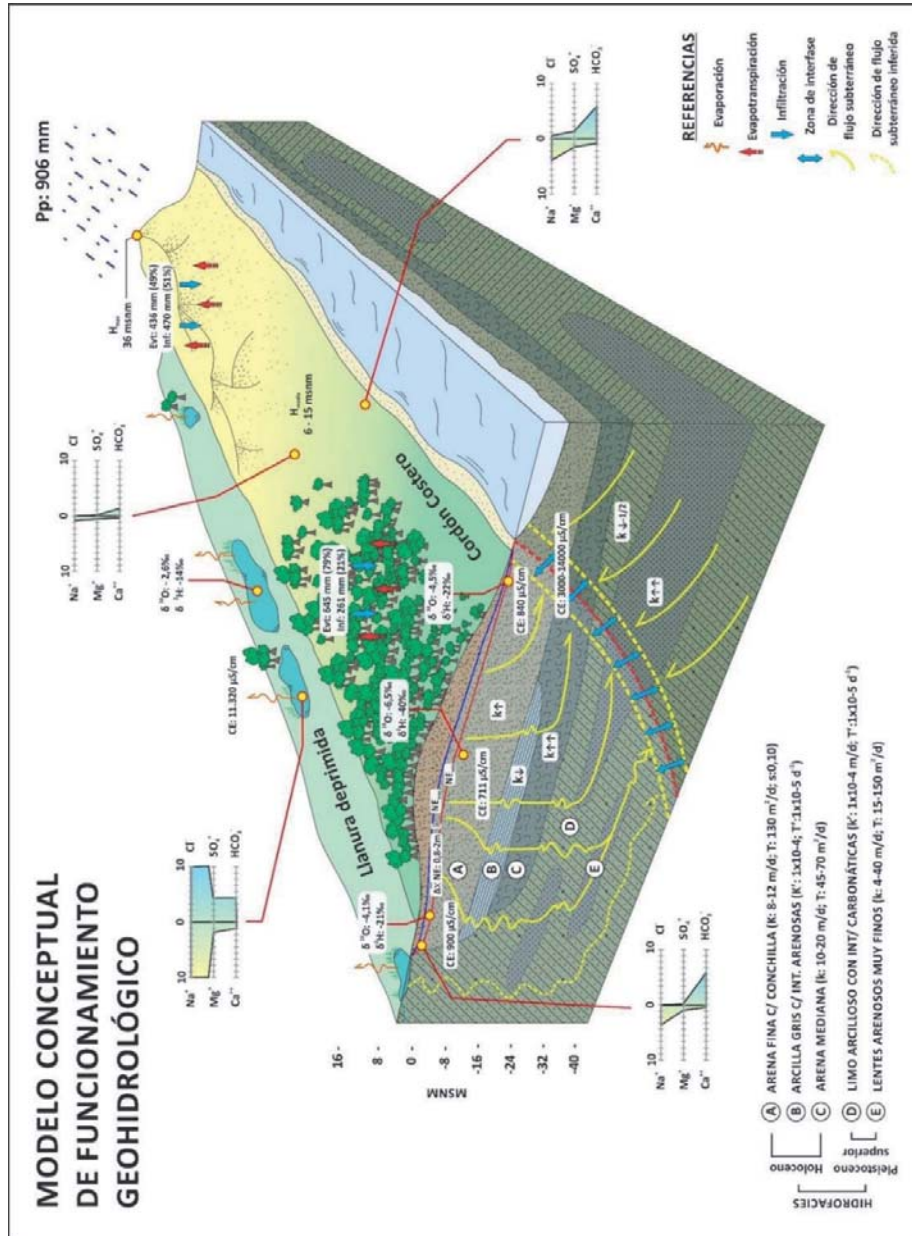


Figura 3. Modelo conceptual de funcionamiento geohidrológico.

Las unidades litológicas reflejan la evolución de un área costera asociada a procesos transgresivos y regresivos que se caracterizan por una sedimentación con variaciones laterales tanto en espesores como en su composición litológica. El control ejercido por los

factores geológicos y geomorfológicos implicados en el modelado del paisaje, explican las diferencias en cuanto a las distintas asociaciones litológicas y sus comportamientos hidrogeológicos asociados (hidrofacies). Esta condición es la responsable de la variada conexión entre los niveles acuíferos, la cual es función de la presencia y variaciones en el espesor de los niveles acuitardos.

El esquema geohidrológico se compone de una base de edad Pleistocena superior compuesta por “limos arcillosos con intercalaciones carbonáticas” (hidrofacies D) dentro de las cuales se encuentra incluido un nivel acuífero compuesto por las lentes de “arena muy fina” (hidrofacies E). El Holoceno temprano se constituye por las “arenas medianas” (hidrofacies C) de las barreras transgresivas que representan a una unidad acuífera, y por las “arcillas grises con intercalaciones arenosas” que, formadas en un ambiente de baja energía, conforman un nivel acuitardo (hidrofacies B). Por último, el Holoceno reciente se encuentra representado por las “arenas finas” (hidrofacies A) de la cadena de médanos actual.

El flujo subterráneo de la capa freática (hidrofacies A) está representado por curvas equipotenciales orientadas en forma paralela a la costa, con una divisoria de agua subterránea que tiende a coincidir con las máximas alturas topográficas del cordón costero y sentidos de flujo subterráneo hacia el este (mar) y hacia al oeste (continente) (Figura 2).

La capa freática se recarga naturalmente en forma directa por infiltración de los excesos de la precipitación. La recarga de las unidades profundas se produce por filtración vertical en forma indirecta desde la capa freática tal como se deduce de las diferencias de carga hidráulica, siendo ello más manifiesto en los sectores topográficamente más altos.

Las coberturas del suelo, que incluyen forestación, urbanización y médanos con escasa vegetación o desnudos muestran diferentes condiciones de infiltración que se reflejan en la configuración del flujo de la capa freática. En este sentido se reconocen mayores excesos en el suelo desnudo (470 mm/año) con respecto a suelo forestado (261 mm/año), reflejando condiciones de mayor evapotranspiración para la cobertura arbórea.

Las características hidroquímicas e isotópicas confirman las condiciones de recarga y flujo subterráneo que se deduce de las condiciones de flujo. Se aprecia un aumento de los valores de conductividades eléctricas en ambos sentidos de flujo el cual es acompañado por un incremento de las concentraciones iónicas, en particular las del HCO_3^- , Na^+ y Cl^- . Asimismo, la distribución de los contenidos isotópicamente más empobrecidos en el sector central del cordón permite deducir áreas preferenciales de recarga, en tanto que el enriquecimiento en los contenidos de ^{18}O y ^2H hacia ambos sectores de la divisoria confirman el sentido de flujo.

Con el objeto de representar de manera integral los efectos de la actividad antrópica en la figura 4 se ilustran los principales efectos producto de la actividad antrópica sobre el modelo conceptual anteriormente desarrollado.

Localmente la existencia de perforaciones de explotación de agua subterránea ubicadas sin un criterio hidrogeológico provoca conos o áreas de abatimiento que se reconocen en las fluctuaciones de los niveles freáticos y en la evolución de los mapas de flujo subterráneo particularmente en las localidades de Pinamar, Valeria del mar y Cariló. La relación entre el sistema de perforaciones y la falta del sistema cloacal en representa un potencial riesgo para la población en cuanto a las características hidroquímicas de las aguas alumbradas (ver ítems 6 y 7 en Figura 4). Asimismo, la figura 4 también permite apreciar que, de acuerdo a su posición en el cordón, las perforaciones que se ubican en los 500 m anteriores a la línea de costa captan dos niveles acuíferos diferentes (hidrofacies A y C).

Lo mismo ocurre con la recarga artificial que se genera a partir de la planta de tratamiento de efluentes líquidos cloacales produciendo una deformación de las líneas de flujo en este sector.

Las actividades antrópicas relacionadas con la explotación del agua subterránea, la recarga desde la planta de tratamiento y la urbanización carente de servicios de saneamiento también tiene implicancias en la composición química e isotópica del agua.

En el caso de la planta de tratamiento ubicada en Pinamar, la principal consecuencia se relaciona con infiltración de aguas parcialmente tratadas cuyo contenido de nitratos es

relativamente elevado (20-30 mg/L de NO_3^-). La misma problemática se aprecia en Pinamar (10-20 mg/L) y Cariló (30-40 mg/L de NO_3^-) aunque en estos casos el origen se encuentra vinculado a deficiencias en el sistema de saneamiento o bien a la falta de prestación de dicho servicio. La conexión de las hidrofacies A y C en los sectores costeros representa un potencial deterioro de la calidad química de esta última en función de los contaminantes pudieran ser volcados al terreno en esta zona.



Figura 4. Principales efectos antrópicos sobre el modelo geohidrológico conceptual propuesto.

Otro de los efectos asociados a la explotación se verifica a partir del avance del frente salino identificado a partir de los abruptos cambios de la conductividad eléctrica en profundidad en las localidades de Pinamar, Valeria del Mar y Cariló.

CONCLUSIONES

Se reconoce un único sistema geohidrológico del orden de 50 m de espesor. Está integrado por 3 niveles acuíferos correspondientes a las hidrofacies A, C (Holoceno) y E (Pleistocena superior). Los 3 niveles acuíferos son explotados en forma simultánea, presentando intercalaciones de niveles de menor permeabilidad (acuitardos) representados por las hidrofacies B y D (Holoceno).

El flujo subterráneo de la capa freática (hidrofacies A) es hacia el este (mar) y hacia al oeste (continente) a partir de una divisoria de agua subterránea que tiende a coincidir con las máximas alturas topográficas del cordón costero. Este nivel se recarga naturalmente en

forma directa por infiltración de los excesos de la precipitación y a partir de esta por filtración vertical se produce la recarga de las unidades más profundas.

Las coberturas del suelo, que incluyen forestación, urbanización y médanos con escasa vegetación o desnudos muestran diferentes condiciones de infiltración cuya manifestación se identifica en tanto en la configuración del flujo subterráneo, como en los excesos estimados los cuales alcanzan los 470 y 261 mm/año para los suelos desnudos y forestados respectivamente

Las características hidroquímicas e isotópicas confirman las condiciones de recarga y flujo subterráneo, los cuales son identificados a partir de un aumento de las conductividades eléctricas, el incremento de las concentraciones iónicas para el HCO_3^- , Na^+ y Cl^- en ambos sentidos de flujo y la distribución de los contenidos isotópicos para el ^{18}O y ^2H .

El sistema de explotación de aguas subterráneas provoca localmente áreas de abatimiento que se reconocen en las fluctuaciones de los niveles freáticos y en la evolución de los mapas de flujo subterráneo y que son manifestados a partir conos de depresión en los sectores costeros de las localidades de Pinamar, Valeria del Mar y Cariló.

La relación entre el sistema de extracción y la falta de un sistema cloacal representa un potencial riesgo para la población, particularmente en los sectores aledaños a la planta de tratamiento de líquidos cloacales en donde se han detectado contenidos de nitratos de 20-30 mg/L de NO_3^- y en la zona céntrica de Cariló en donde los mismos alcanzan los 30-40 mg/l.

En vistas del marcado incremento demográfico que este sector manifiesta año a año esta investigación posibilita delinear un nuevo horizonte en el grado de conocimiento hidrogeológico para la región.

El enfoque empleado establece los argumentos que, dentro de un marco evolutivo global, definen la base conceptual y aplicada a tener en cuenta durante la formulación de modelos conceptuales y numéricos a escala local y regional.

REFERENCIAS

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. & Smith, M.** 1998. Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage. N° 56, 290 p.
- Anderson M. P.** 1989. Hydrogeological facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. Geological Society of American Bulletin, 101: 501–511.
- Bocanegra E., Cardoso Da Silva G., Custodio E., Manzano M. & Montenegro S.** 2010. State of knowledge of coastal aquifer management in South America. Hydrogeology Journal, 18: 261–267.
- Falasca S. & Forte Lay J.A.** 2006. Actualización de la evapotranspiración de referencia por el método de Penman-Monteith en la República Argentina. Congreso de AADA. La Plata, Argentina.
- Kruse E. & Mas-Plá, J.** 2009. Procesos hidrogeológicos y calidad del agua en acuíferos litorales. 2009. Gestión ambiental integrada de áreas costeras; p:29-53.
- Manzano, M.** 2002. El papel de los acuíferos costeros en la gestión del medio natural. Groundwater and Human Development: 2017-2024. Mar del Plata.
- Pousa J., Kruse E., Tosi L., Guaraglia D., Bonardi M., Rizzetto F., Schnack, E.** 2007. Coastal Processes and environmental hazards: The Buenos Aires (Argentina) and Venetian (Italy) Littorals. Environmental Geology, v.51, p.1307 – 1316.
- Schneider J.C. & Kruse S.E.** 2005. Assessing selected natural and anthropogenic impacts on freshwater lens morphology on small barrier Islands: Dog Island and St. George Island, Florida, USA. Hydrogeology Journal Vol. 14: 131–145.
- Teruggi M.** 1959. Las arenas de la costa de la Provincia de la costa de Buenos Aires entre el Cabo de San Antonio y Bahía Blanca. Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigación Tecnológica 2 (77): 1-37.
- Thorntwaite C. W.** 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review. 38 (1): 55-94.
- White I. & Falkland, T.** 2010. Management of freshwater lenses on small Pacific islands. Hydrogeology Journal, 18: 227–246.