

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 Bocanegra¹, 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.

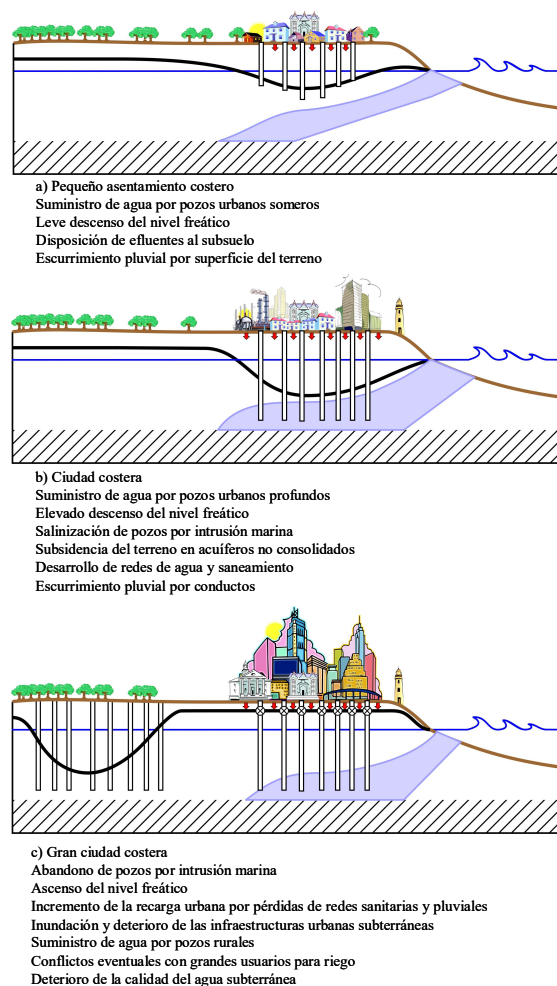


Figura 1. Efectos de la evolución urbana costera sobre los recursos hídricos subterráneos. Tomado de Foster *et al.* (1998)

- 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).

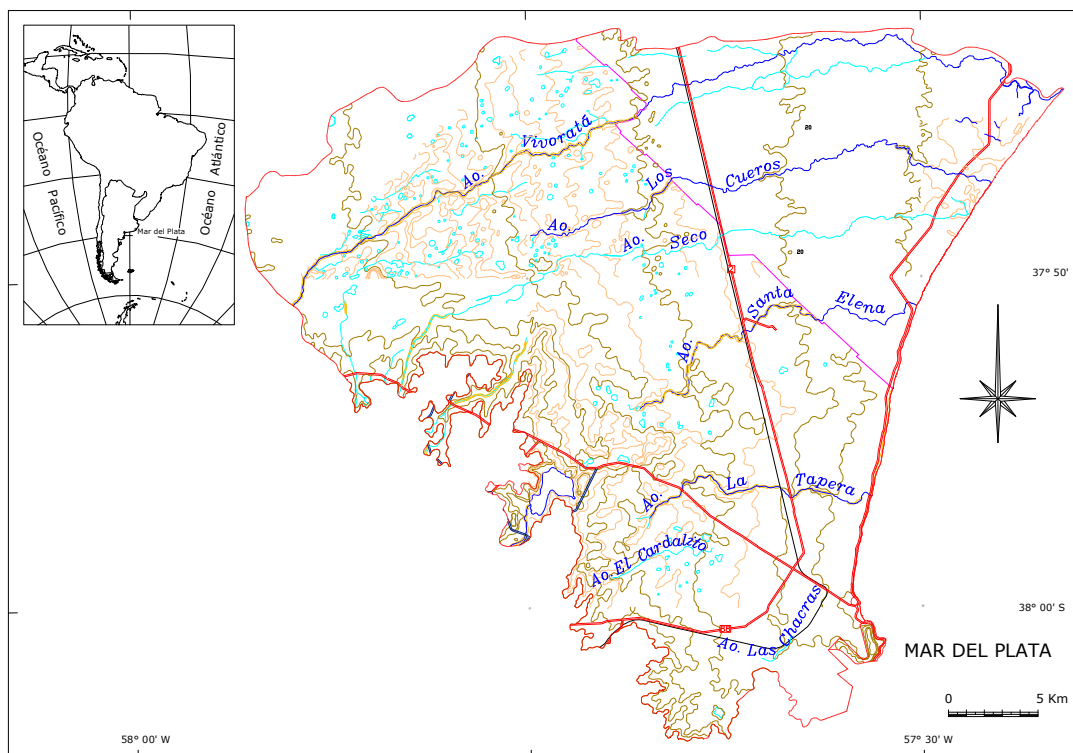


Figura 2. Mapa del área de estudio

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).

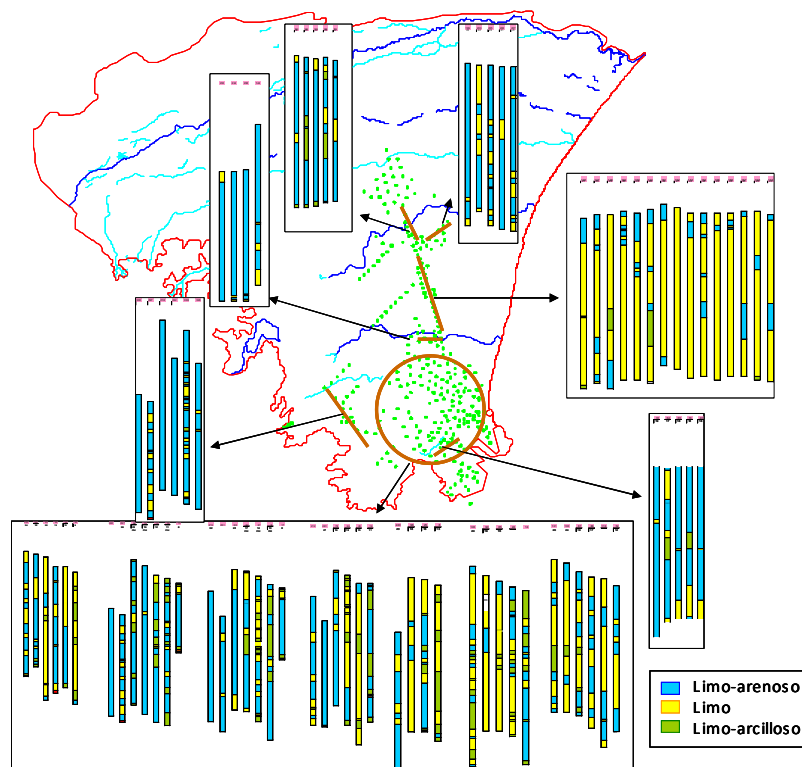


Figura 4. Distribución espacial de perfiles litológicos de perforaciones de Obras Sanitarias

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.

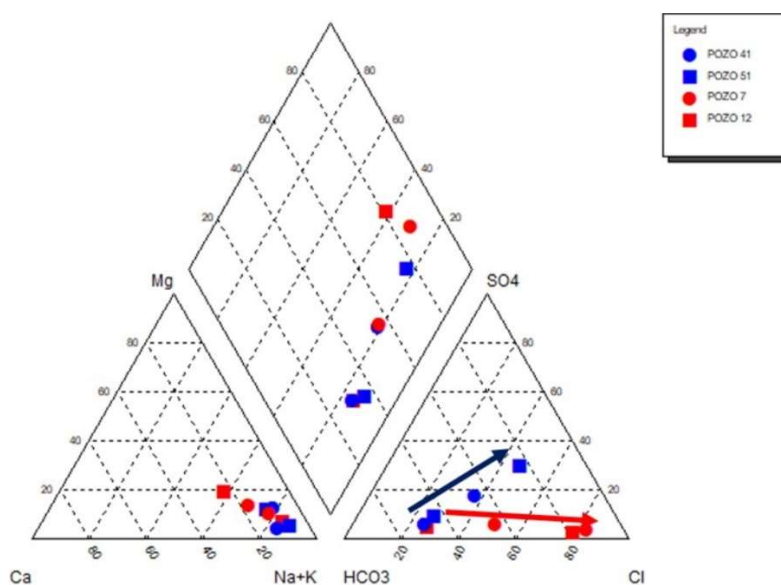


Figura 5. Evolución hidroquímica de los pozos del centro de la ciudad (en color rojo) y del puerto (en color azul) antes y después de la intrusión marina

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).

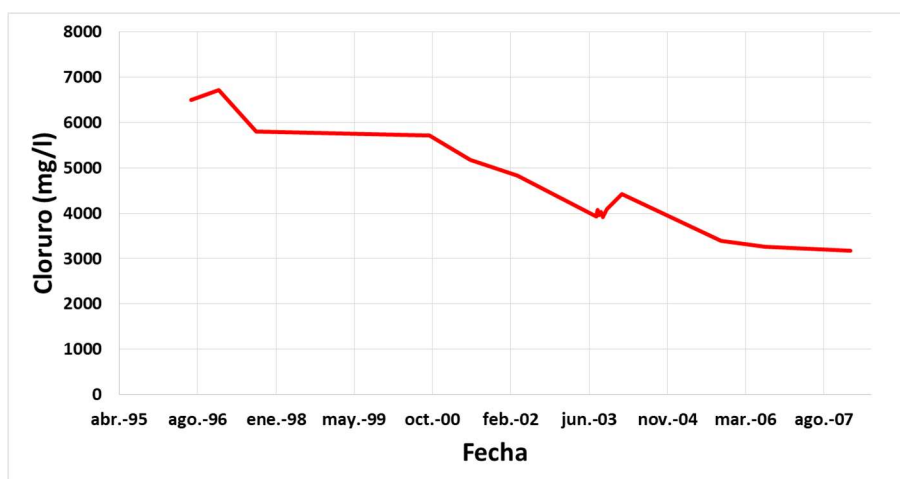


Figura 6. Evolución de los contenidos de cloruros en el Pozo 1 de Obras Sanitarias, en el centro de la ciudad.

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.

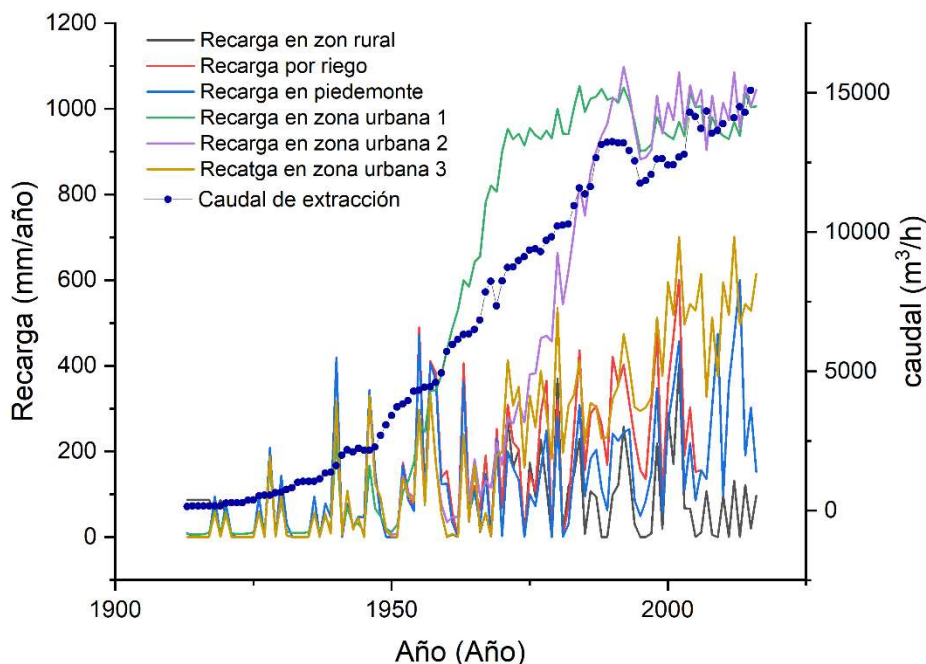


Figura 7. Variación espacial de la recarga y evolución de caudales de extracción.

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.

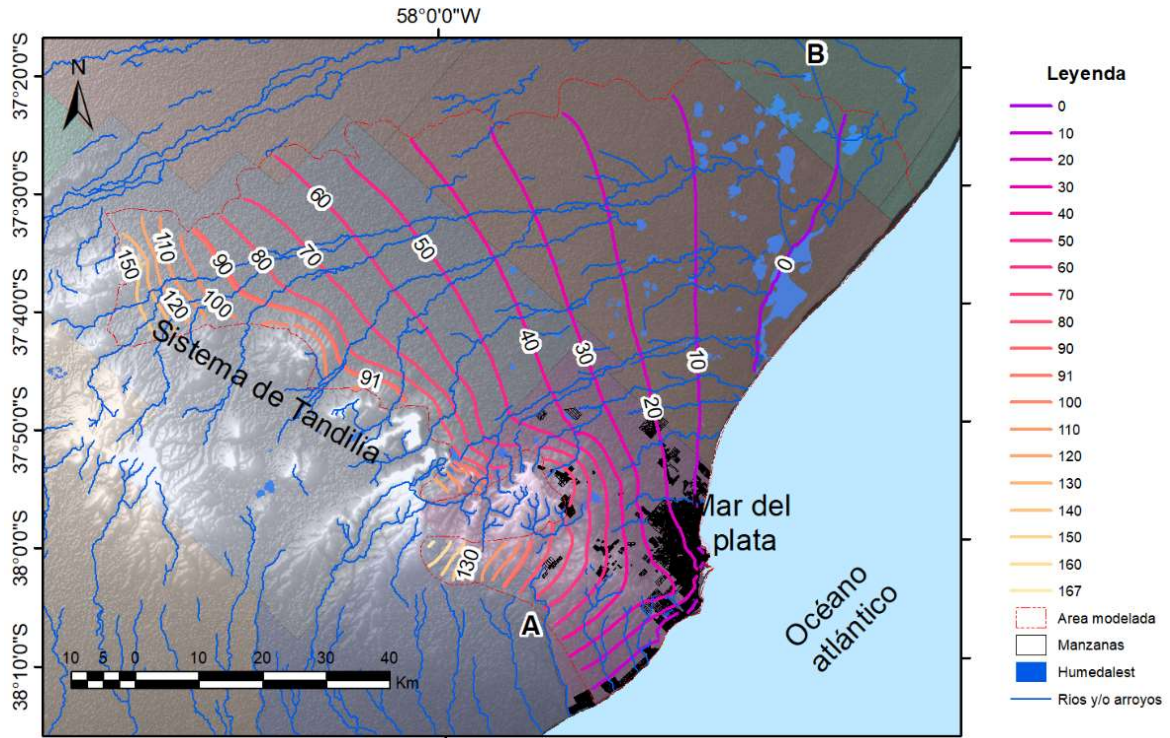


Figura 8. Mapa piezométrico modelado para el año 1903.

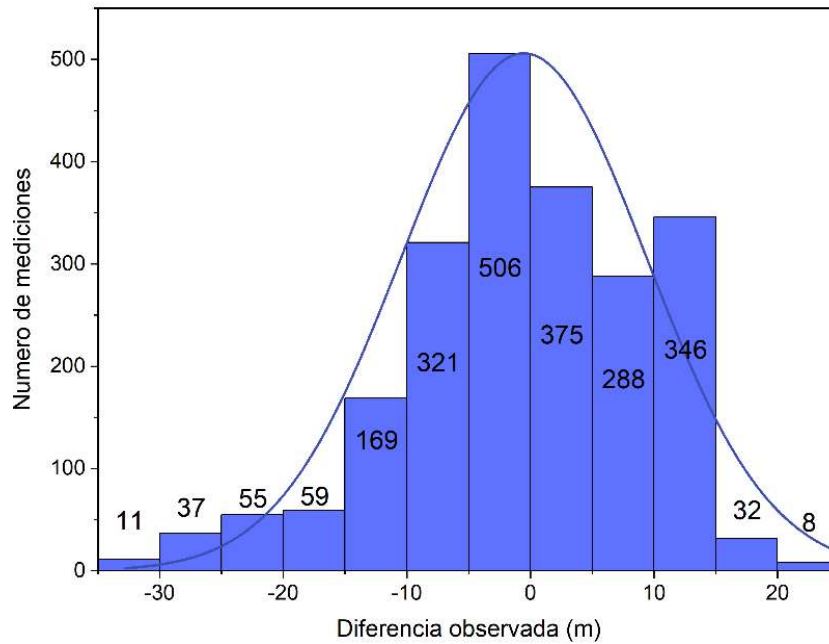


Figura 9. Distribución de errores residuales calculados en toda la extensión temporal del modelo.

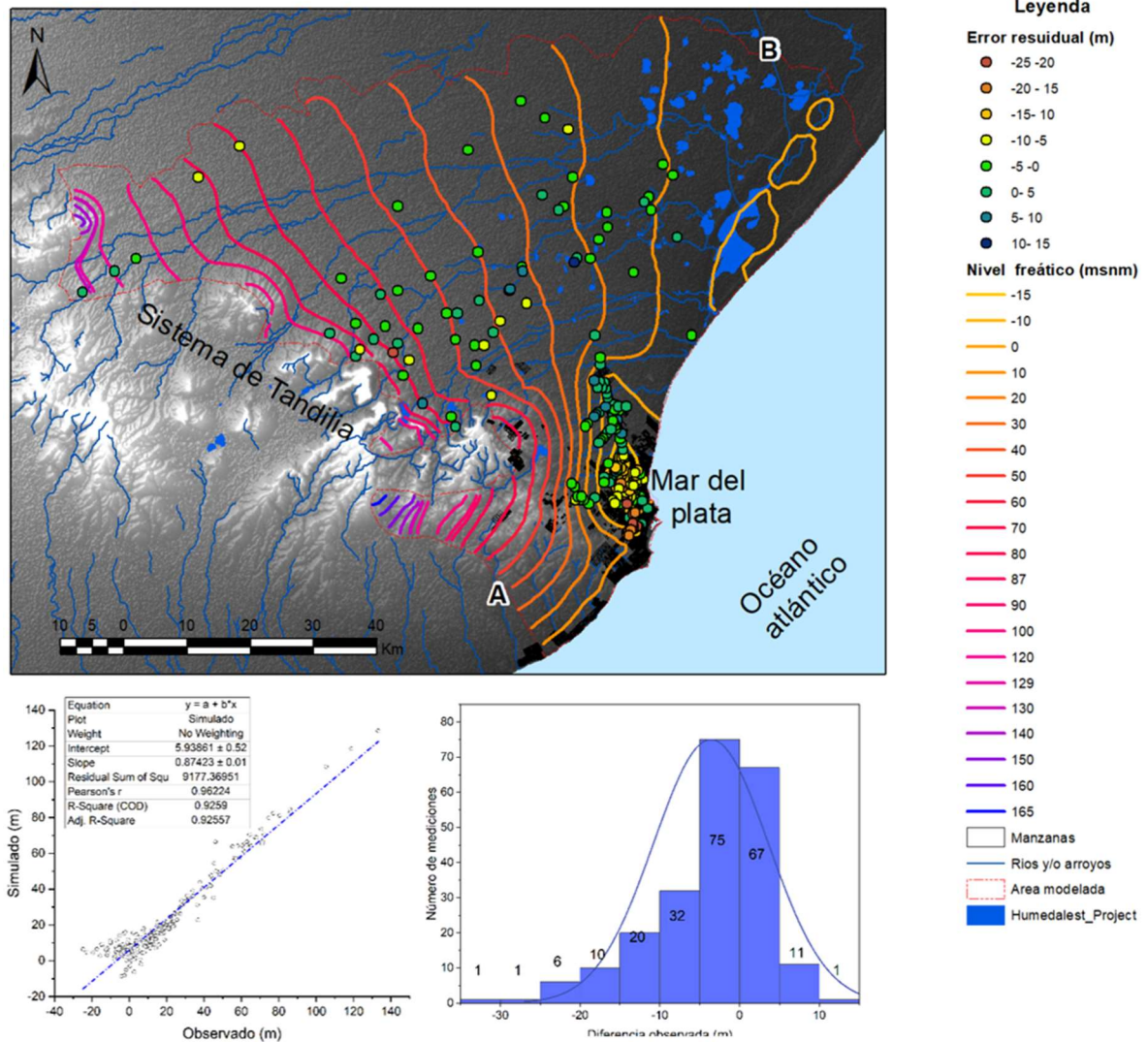


Figura 10. Mapa piezométrico modelado para el año 2016 y ajuste de niveles piezométricos.

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.