



Fundación
Miguel Lillo
Tucumán
Argentina

doi

Evaluación hidrogeológica del acuífero Pampeano y la Formación Balcarce en el sector periurbano sur de Mar del Plata

Hydrogeological assessment of the Pampeano Aquifer and the Balcarce Formation in the southern peri-urban sector of Mar del Plata

Orlando Mauricio QUIROZ LONDOÑO^{1,2*} , Jesús David GÓMEZ² ,
Asunción ROMANELLI^{1,2} 

¹ CONICET, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC), CONICET.

² Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario "Dr. Enrique Jorge Schnack" UNMDP- CIC.

* Autor de contacto: <qlondono@mdp.edu.ar>

Resumen

El sector periurbano sur de Mar del Plata depende del acuífero Pampeano para su abastecimiento, aunque su reducido espesor saturado y la creciente demanda han impulsado la perforación de la Formación Balcarce como posible unidad complementaria. Este estudio caracteriza ambas unidades mediante la integración de datos hidroquímicos, isotópicos, ensayos de bombeo y modelación numérica, con el objetivo de evaluar su comportamiento hidráulico y potencial de explotación. Se relevaron tres captaciones, dos en el acuífero Pampeano y una en la Formación Balcarce. Los análisis hidroquímicos muestran facies bicarbonatadas sódicas en ambas unidades, aunque el agua de la Formación Balcarce presenta mayor conductividad eléctrica y contenido de cloruros, asociados posiblemente a tiempos de residencia más prolongados. La composición isotópica indica un origen meteórico común y evidencia conectividad hidráulica vertical condicionada por fracturas. Los ensayos de bombeo muestran comportamientos contrastantes: el acuífero Pampeano presenta transmisividad y recuperación compatibles con el abastecimiento domiciliario, mientras que la Formación Balcarce exhibe

► Ref. bibliográfica: Quiroz Londoño, O. M.; Gómez, J. D.; Romanelli, A. 2026. "Evaluación hidrogeológica del acuífero Pampeano y la Formación Balcarce en el sector periurbano sur de Mar del Plata". *Acta Geológica Lilloana* 37 (2): 75-95. DOI: <https://doi.org/10.30550/j.agl/2335>

► Recibido: 11 de diciembre 2025 – Aceptado: 8 de julio 2026.

► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.



OPEN ACCESS

baja transmisividad, rápido descenso del nivel dinámico y recuperación lenta. El modelo numérico reproduce la influencia del humedal como principal zona de descarga y muestra que distribuir la extracción entre dos pozos reduce el abatimiento. Los resultados indican que la Formación Balcarce actúa como un reservorio secundario alimentado por flujos descendentes y que el manejo sostenible del acuífero Pampeano requiere monitoreo continuo, protección de las áreas de recarga y estrategias de extracción distribuidas.

Palabras clave: Hidrogeología, Acuífero Pampeano, Formación Balcarce, Isótopos estables, Pruebas de bombeo, Modelación numérica.

Abstract

The southern peri-urban sector of Mar del Plata relies on the Pampeano Aquifer as its primary water supply. However, its limited saturated thickness and increasing water demand have promoted the use of the Balcarce Formation as a complementary groundwater resource. This study characterizes both hydrogeological units by integrating hydrochemical and isotopic data, pumping tests, and numerical groundwater flow modeling to evaluate their hydraulic behavior and groundwater potential. Three wells were investigated, including two screened in the Pampeano Aquifer and one in the Balcarce Formation. Hydrochemical analyses revealed sodium-bicarbonate water facies in both units, although groundwater from the Balcarce Formation showed higher electrical conductivity and chloride concentrations, consistent with longer groundwater residence times. Stable isotope compositions indicated a common meteoric origin and provided evidence of vertical hydraulic connectivity controlled by fractures. Pumping tests revealed contrasting hydraulic responses: the Pampeano Aquifer showed transmissivity and recovery consistent with domestic water supply, whereas the Balcarce Formation exhibited low transmissivity, rapid drawdown, and slow recovery. The calibrated numerical model reproduced the wetland as the main groundwater discharge zone and showed that distributing pumping between two wells reduced drawdown. These results indicate that the Balcarce Formation acts as a secondary groundwater reservoir sustained by downward leakage from the Pampeano Aquifer. Sustainable groundwater management therefore requires continuous monitoring, recharge-area protection, and distributed pumping strategies.

Keywords: Hydrogeology, Pampeano Aquifer, Balcarce Formation, Stable isotopes, Pumping tests, Numerical modeling.

INTRODUCCIÓN

El sudeste de la provincia de Buenos Aires constituye una región estratégica para el desarrollo agrícola, industrial y turístico de Argentina, donde numerosas localidades dependen casi exclusivamente de los recursos hídricos subterráneos para su abastecimiento. En este contexto, el acuífero Pampeano ha representado históricamente la principal fuente de agua para la ciudad de Mar del Plata y su área periurbana, lo que ha motivado numerosos estudios orientados a comprender su funcionamiento hidrogeológico, calidad del agua y vinculación con los sistemas superficiales (Bocanegra *et al.*, 1993; Cionchi *et al.*, 2000; Martínez y Bocanegra, 2002; Bocanegra, 2011; Galli *et al.*, 2017). No obstante, las transformaciones recientes en el uso y cobertura del suelo, el incremento sostenido de la demanda de agua subterránea, la expansión urbana, los riesgos asociados a fuentes de contaminación difusa y puntual, así como la creciente variabilidad climática, han intensificado las presiones sobre este sistema acuífero. Estas condiciones plantean nuevos desafíos para la gestión sostenible del recurso, resaltando la necesidad de fortalecer los modelos conceptuales hidrogeológicos existentes y de evaluar con mayor precisión los mecanismos que controlan su funcionamiento, disponibilidad y vulnerabilidad frente a escenarios de explotación creciente y cambios ambientales.

A escala global, la expansión urbana altera de manera significativa los procesos hidrológicos, influenciando la recarga, incrementando las cargas de contaminantes y modificando la interacción entre aguas superficiales y subterráneas (Mahlknecht *et al.*, 2020; Schirmer *et al.*, 2013). Mar del Plata constituye un caso emblemático: la explotación intensiva del acuífero costero durante el siglo XX favoreció la intrusión marina y la degradación de la calidad del agua (Mérida, 2002), mientras que su posterior recuperación generó impactos sobre la infraestructura urbana (Bocanegra *et al.*, 2022). Para mitigar estos efectos, la captación se desplazó hacia sectores continentales de la ciudad (Barilari *et al.*, 2020), pero los recientes desarrollos residenciales en el sector sur continúan dependiendo de perforaciones individuales ante la ausencia de redes públicas de agua potable (Isla *et al.*, 2018).

Estudios regionales en el piedemonte de Tandilia muestran que la arquitectura sedimentaria controla de manera decisiva el comportamiento hidráulico del acuífero Pampeano y de las unidades fracturadas subyacentes. Silva Busso y Amato (2012) documentaron que en esta región los depósitos detríticos presentan una marcada variabilidad lateral en espesor, granulometría y continuidad, con transmisividades que pueden variar en más de un orden de magnitud (30 a >500 m²/d). Dichos autores describen como el basamento cristalino ejerce un fuerte control hidroestratigráfico y que existe una conectividad vertical significativa entre los sedimentos pampeanos, los depósitos periserranos y las rocas fracturadas. Este marco resulta especialmente relevante para interpretar la hidrogeología local del sector sur de Mar del Plata, donde la presencia del basamento de la Formación

Balcarce y la heterogeneidad del Pampeano condicionan la productividad de las captaciones y su dinámica de recarga.

En la zona periurbana sur de Mar del Plata, el acuífero Pampeano presenta espesores que varían entre 20 y 100 m (Auge, 2004), alcanzando aproximadamente 90 m en el área de estudio, y una capacidad de almacenamiento moderada que limita su productividad. Como consecuencia, en los últimos años se ha intensificado la perforación de la Formación Balcarce, una unidad de ortocuarcitas de muy baja porosidad primaria que constituye el basamento hidrogeológico regional (Bocanegra *et al.*, 1993; Massone *et al.*, 2008; Pool *et al.*, 2015). Si bien esta formación puede almacenar agua en sistemas de fracturas, su comportamiento hidráulico, su conectividad con el Pampeano y su potencial como fuente complementaria de abastecimiento permanecen escasamente documentados en el área de Mar del Plata. Este vacío de información limita la capacidad de evaluar riesgos, definir estrategias de explotación y establecer criterios de gestión sustentable. El presente estudio se enmarca en una primera caracterización integral realizada para la asociación civil Ecomuna, donde se combinaron datos hidroquímicos, isotópicos e hidrodinámicos para evaluar la disponibilidad de agua en el predio.

El caso cobra particular relevancia dado que existen antecedentes que analizan la relación entre acuíferos detríticos y fracturados en la región de Mar del Plata. En especial, Galli *et al.* (2017) demostraron que ambos sistemas pueden compartir señales isotópicas similares y que la interacción entre ellos depende de los mecanismos de infiltración, la estructura de fracturas y las condiciones hidrogeológicas locales. No obstante, estos estudios se enfocaron a escala regional y no abordaron la evaluación detallada de captaciones específicas ni el desempeño hidráulico comparado de ambas unidades en un contexto de demanda residencial.

En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar las propiedades físico-químicas, isotópicas e hidráulicas de los acuíferos Pampeano y Balcarce en un predio multifamiliar del sector sur de Mar del Plata, analizar la respuesta de sus captaciones mediante ensayos de bombeo y desarrollar un modelo conceptual y numérico que permita evaluar estrategias de explotación. Este enfoque integrado no pretende reemplazar los aportes previos, sino complementarlos mediante un estudio aplicado que documenta con mayor detalle la dinámica local de ambos acuíferos frente a una demanda real, aportando información útil para la gestión sostenible del recurso en zonas periurbanas con creciente presión urbana.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Partido de General Pueyrredón se ubica en el extremo noroccidental del sistema serrano de Tandilia, dentro del Positivo Bonaerense, una región caracterizada por la alternancia de sierras bajas, lomadas y llanuras interserranas (Cingolani, 2005), donde se localiza el predio analizado (Figura 1). La estratigrafía regional comprende tres grandes unidades: un basamento cristalino Precámbrico, la cubierta sedimentaria precenozoica y los sedimentos cenozoicos asignados a la Formación Pampeana (Teruggi y Kilmurray, 1975). Desde la perspectiva hidrogeológica, estas unidades se reducen funcionalmente a dos sistemas principales: el acuífero Pampeano y el basamento hidrogeológico constituido por las ortocuarcitas de la Formación Balcarce.

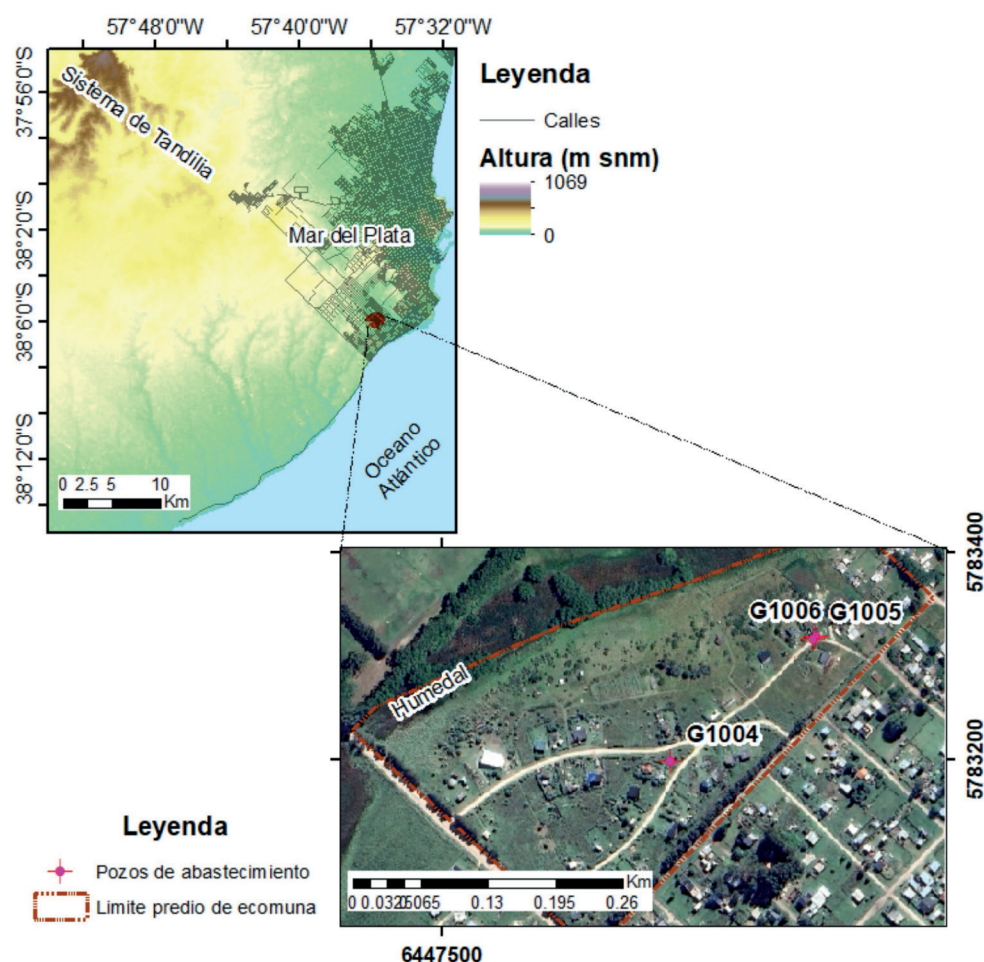


Figura 1. Localización del área de estudio.

El acuífero Pampeano está formado por sedimentos limo-arenosos y arenas finas con intercalaciones arcillosas, configurando un sistema libre a semiconfinado cuyo espesor en el sector sur de Mar del Plata alcanza aproximadamente 35 m. Este acuífero presenta una zona no saturada de 4,5 a 6 m de espesor, lo que define un espesor saturado efectivo cercano a 29 m. Diversos estudios han documentado su relevancia regional y sus parámetros hidráulicos característicos, con permeabilidades entre 10 y 20 m/día (Bocanegra, 1993) y transmisividades que pueden superar los 500 m²/día, llegando a 1400 m²/día en sectores próximos al Parque Industrial (Cionchi *et al.*, 2000). La porosidad efectiva de los sedimentos pampeanos suele situarse entre 5% y 10% (Auge, 2004; Ruiz de Galarreta *et al.*, 2007).

El basamento hidrogeológico está constituido por las ortocuarcitas de la Formación Balcarce, una unidad de muy baja porosidad primaria pero que puede almacenar y transmitir agua a través de fracturas y diaclasas (Galli *et al.*, 2017). Aunque este sistema ha sido tradicionalmente considerado un basamento impermeable, estudios recientes muestran que puede albergar flujos secundarios de agua, cuya magnitud depende del grado de fractura y continuidad hidráulica. Sin embargo, su potencial como acuífero es aún limitado y poco documentado para la zona de Mar del Plata, donde solo un número reducido de perforaciones lo intercepta.

El clima de la región es subhúmedo-seco y mesotermal (Thornthwaite, 1948), con una precipitación media anual entre 850 y 930 mm y temperaturas promedio de aproximadamente 14 °C (Bocanegra *et al.*, 2022). La evapotranspiración anual se sitúa alrededor de 750 mm (Quiroz Londoño *et al.*, 2025), lo que permite estimar una recarga efectiva del orden del 10 al 17%, en concordancia con estudios regionales (Quiroz Londoño *et al.*, 2012; Quiroz Londoño *et al.*, 2023; Varni *et al.*, 1999).

En el predio analizado, la recarga ocurre principalmente por infiltración directa de la precipitación y por aportes difusos asociados a un humedal estacional localizado en su límite norte. Este humedal se desarrolla en una depresión topográfica y presenta vegetación hidrófila y macrófitas, lo que evidencia condiciones saturadas recurrentes y una conexión hidráulica potencial con el acuífero Pampeano. La dirección regional del flujo subterráneo en este sector es suroeste-noreste, consistente con los gradientes observados en la llanura interserrana bonaerense.

MATERIALES Y MÉTODOS

Inventario de captaciones

Se realizó un relevamiento de las captaciones existentes dentro del predio mediante inspección directa, registro de coordenadas, mediciones de niveles y verificación de condiciones constructivas. Esta información se complementó con los datos almacenados en el Sistema de Información Geográfica (SIG) del Grupo de Hidrogeología de la Universidad Nacional de Mar del

Plata (UNMdP), el cual contiene perforaciones de referencia, modelos de elevación y cartografía hidrogeológica regional. A partir de este inventario se identificaron las captaciones activas y se definieron los puntos de muestreo y de ensayo hidráulico utilizados en este estudio.

Muestreo, análisis hidroquímico e isotópico

El muestreo se realizó en 2023 siguiendo los procedimientos estándar de la American Public Health Association (APHA, 2005). Antes de la toma de muestras, cada pozo fue purgado mediante bombeo continuo hasta alcanzar la estabilización de temperatura, pH y conductividad eléctrica (variación $<5\%$ entre mediciones consecutivas), registrados con un equipo multiparamétrico HANNA HI 9828, garantizando así la representatividad del agua extraída. Las muestras destinadas al análisis hidroquímico se recolectaron en botellas de polietileno de alta densidad (HDPE), previamente enjuagadas con el agua del pozo, y se transportaron bajo cadena de frío al Laboratorio de Hidrogeoquímica e Hidrología Isotópica de la UNMdP y Consejo de Investigaciones de la Provincia De Buenos Aires (CICPBA). Para la determinación de iones mayoritarios se utilizaron botellas de 1.000 mL; para la determinación de cationes, las muestras se filtraron in situ ($0,45\ \mu\text{m}$) y se preservaron con HNO_3 hasta $\text{pH} < 2$. Los aniones y cationes se determinaron según los métodos analíticos descritos en APHA (2005): titulación argentométrica (Cl^-), turbidimetría (SO_4^{2-}), titulación complejométrica (Ca^{2+} , Mg^{2+}), fotometría de llama (Na^+ , K^+) y titulación potenciométrica para alcalinidad ($\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$). Las facies hidroquímicas se clasificaron mediante diagramas de Piper generados en AquaChem (Calmbach, 1997). Adicionalmente, se integró información del Sistema de Información Geográfica (SIG) del Grupo de Hidrogeología de la UNMdP para contextualizar la composición regional del acuífero Pampeano.

Las muestras destinadas al análisis de isótopos estables del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) se recolectaron en frascos de polietileno de 25 mL, evitando burbujas de aire y asegurando un cierre hermético para prevenir evaporación o fraccionamiento isotópico. Los análisis isotópicos se realizaron en un analizador Los Gatos 45 EP equipado con vaporizador, utilizando la técnica de espectroscopía de cavidad óptica (ICOS; Lis *et al.*, 2008). Los resultados se expresaron en notación δ (‰) relativa al estándar VSMOW (Gonfiantini, 1978), con una incertidumbre analítica de $\pm 0,15\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$. Los valores obtenidos se representaron en un diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ y se compararon con la Línea Meteorica Global y con la Línea Meteorica Local de Mar del Plata.

Pruebas de bombeo

Se realizaron ensayos a caudal constante en dos pozos, uno en el acuífero Pampeano y otro en la Formación Balcarce. Los descensos se registraron a intervalos crecientes durante 900 minutos en el pozo somero, mientras que en el pozo profundo el ensayo debió interrumpirse por descenso del nivel dinámico. Los datos se interpretaron mediante los métodos de Theis y Cooper–Jacob, tanto manualmente como con AQTESOLV. La ausencia de pozos de observación limita la detección de efectos de frontera, pero permite estimar transmisividad y permeabilidad comparativa entre ambas unidades.

Modelado del flujo subterráneo

El flujo subterráneo se simuló mediante MODFLOW-2005 implementado en ModelMuse (Winston, 2009). Se construyó un modelo numérico de una capa que representa el espesor saturado del acuífero Pampeano, definiendo un dominio de modelación de 0,34 km². El dominio fue discretizado mediante una malla regular de diferencias finitas con celdas de 42 × 42 m, resolución considerada adecuada para representar los patrones locales de flujo subterráneo. Los parámetros hidráulicos iniciales se obtuvieron a partir de pruebas de bombeo y antecedentes hidrogeológicos regionales (Bocanegra *et al.*, 2005). La extensión espacial del modelo fue seleccionada de manera que incluyera la totalidad del área de estudio y sus principales controles hidrogeológicos, minimizando la influencia de las condiciones de borde sobre los resultados de la simulación. La recarga se estimó mediante el balance hídrico de Thornthwaite aplicado a series meteorológicas del SMN (1960–2023). Se incorporó un drenaje lineal para representar el humedal ubicado al norte del predio. El modelo se calibró en régimen estacionario mediante ajuste de niveles piezométricos y posteriormente se desarrolló una simulación transitoria de 12 meses para evaluar dos escenarios de explotación.

RESULTADOS

Inventario y características de las captaciones

El relevamiento de campo permitió identificar tres perforaciones dentro del predio (Figura 1), cuyas características constructivas y disposición vertical se muestran en la Figura 2. Dos de estas captaciones alcanzan profundidades de aproximadamente 35 m y extraen agua exclusivamente del acuífero Pampeano, constituido por sedimentos limo–arenosos con niveles cementados de tosca.

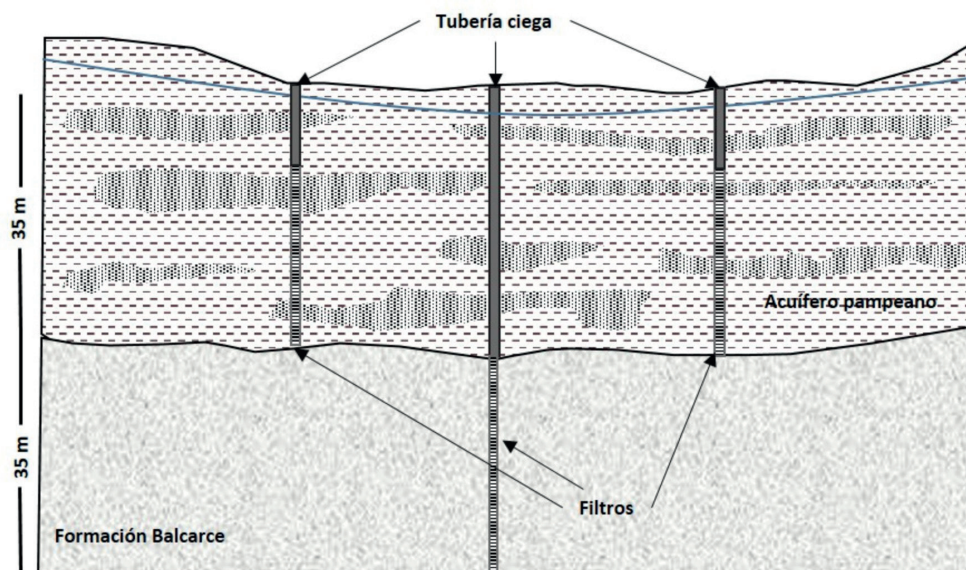


Figura 2. Modelo esquemático de unidades hidrogeológicas analizadas y diseños de pozos. La línea en color azul representa el nivel freático.

La tercera perforación (G1005) alcanza una profundidad de 70 m, atravesando los primeros 35 m correspondientes al acuífero Pampeano y captando únicamente el tramo inferior asociado a las ortocuarcitas fracturadas de la Formación Balcarce. El tramo superior fue acondicionado mediante entubado ciego y sellado, con el propósito de impedir el ingreso de agua desde los niveles someros y reducir la posibilidad de flujo a través del espacio anular entre la perforación y la cañería. Esta configuración confirma la presencia de dos unidades hidrogeológicas superpuestas: un acuífero libre detrítico con elevada porosidad primaria y, por debajo, un acuífero fracturado de baja porosidad, cuya productividad depende del desarrollo del sistema de fracturas. Las diferencias litológicas y estructurales entre ambas unidades se reflejan posteriormente en el comportamiento hidráulico e hidroquímico registrado en las pruebas y análisis realizados.

Caracterización química e isotópica

El análisis hidroquímico evidencia que las muestras correspondientes a los pozos G1004 y G1006, ambos del acuífero Pampeano, y la muestra del pozo G1005, que capta exclusivamente la Formación Balcarce, se ubican dentro del campo de las aguas bicarbonatadas sódicas (Figura 3). Las composiciones iónicas son en general similares entre ambas unidades, aunque el pozo G1005 presenta valores sistemáticamente más elevados de conductividad eléctrica y cloruros respecto de las muestras del Pampeano (1308–1597 frente a 2050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 127–173 frente a 236 mg/L, respectivamente). Si bien este incremento se mantiene dentro del rango característico de las aguas bicarbonatadas sódicas de la región, podría responder a tiempos de resi-

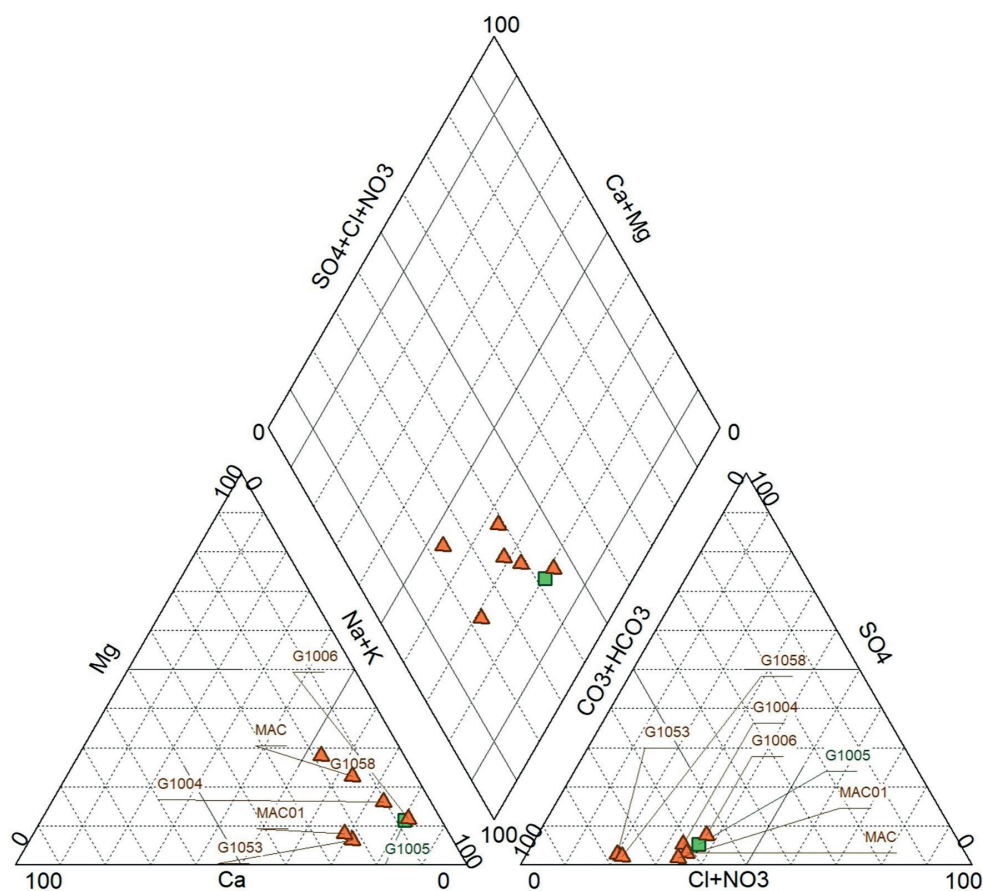


Figura 3. Diagrama de Piper. Los triángulos corresponden a las muestras del acuífero Pampeano mientras que el cuadrado corresponde a la muestra extraída de la Formación Balcarce.

dencia más prolongados y/o a una interacción más extensa con sedimentos finos en profundidad o con incidencia de flujos regionales. Por su parte, los valores de cloruros registrados en G1004 y G1006 resultan comparables con los observados en los manantiales costeros MAC y MAC1, lo que indica que estas aguas conservan una firma química reconocible en sectores más distales del sistema regional. (Gutiérrez *et al.*, 2026)

Los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (Figura 4) de todas las muestras se distribuyen a lo largo de la Línea Meteórica Local de Mar del Plata, lo que confirma un origen meteórico común y un patrón de recarga similar para ambas unidades hidrogeológicas analizadas. Las muestras dentro del predio muestran un desplazamiento que podría indicar cierto grado de evaporación o mezcla con aguas más evaporadas. Por su parte, el humedal presenta una señal isotópica claramente enriquecida ($-3,55\text{‰}$ en $\delta^{18}\text{O}$ y $-19,1\text{‰}$ en $\delta^2\text{H}$). Sin embargo, solo se tomaron datos isotópicos y variable in situ, por lo que las interpretaciones derivadas de esta unidad se basan exclusivamente en la evidencia isotópica y de conductividad disponibles. Esta señal isotópica, junto con su conductividad eléctrica ($1200 \mu\text{S}/\text{cm}$) y el carácter permanente del manantial asociado, podría sugerir la presencia de

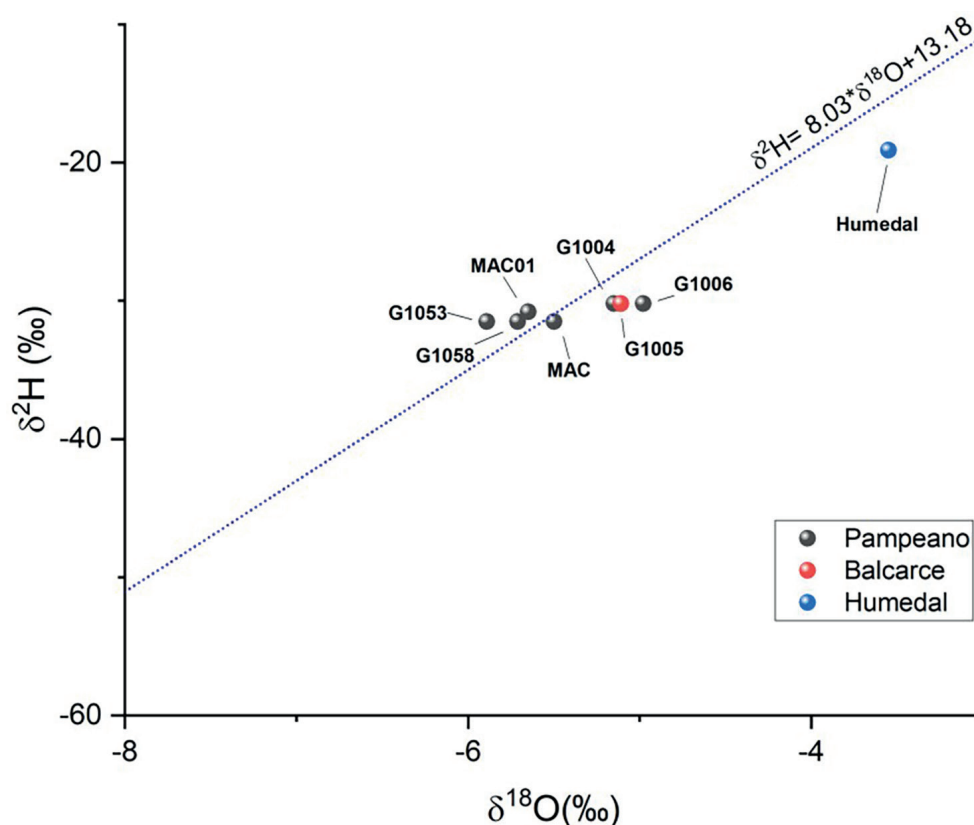


Figura 4. Diagrama convencional de $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ incluyendo muestras del acuífero Pampeano y muestra obtenida de la Formación Balcarce.

un cuerpo de agua somero que recibe aportes combinados de agua subterránea y precipitación directa, donde la evapoconcentración superficial modula la composición isotópica. Este ambiente mixto podría influir localmente en las condiciones de recarga del predio y en la señal isotópica del agua subterránea más somera.

La integración de la información hidroquímica e isotópica indica que, pese a tratarse de unidades con comportamientos hidráulicos contrastantes, el Pampeano y la Formación Balcarce comparten un mismo origen de recarga y presentan composiciones químicas e isotópicas estrechamente relacionadas. Las diferencias observadas reflejan variaciones en tiempos de residencia y condiciones locales de flujo, más que diferencias fundamentales en el origen o naturaleza del agua circulante.

Pruebas de bombeo

Los ensayos de bombeo realizados en el predio evidencian comportamientos hidráulicos marcadamente distintos entre el acuífero Pampeano y la Formación Balcarce. En el pozo G1004, que capta exclusivamente el Pampeano, el descenso total tras 11 horas de bombeo fue de aproximadamente 3,3 m, seguido de una recuperación rápida, el 95 % del nivel original se

restableció en menos de 5 minutos. El caudal promedio registrado durante el ensayo fue de 76 L/min ($\approx 109,5 \text{ m}^3/\text{día}$). La interpretación mediante los métodos de Theis y Cooper–Jacob arrojó una transmisividad cercana a 167 $\text{m}^2/\text{día}$ y una permeabilidad del orden de 5,6 m/día, valores representativos de un acuífero libre con buena capacidad de transmisión y almacenamiento. El coeficiente de almacenamiento estimado ($\approx 0,3$) y la capacidad específica ($1,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$) confirman este comportamiento.

En contraste, en el pozo G1005, que capta únicamente la Formación Balcarce, el ensayo debió interrumpirse a los 16 minutos debido al descenso del nivel dinámico hasta la posición de la electrobomba. El caudal medido durante el ensayo fue de 74,1 L/min ($\approx 106,7 \text{ m}^3/\text{día}$) y el volumen total extraído alcanzó $1,18 \text{ m}^3$. La recuperación posterior fue lenta e incompleta, alcanzando solo el 88% del nivel inicial después de 9 horas. El análisis de la curva de recuperación estimó una permeabilidad de 0,02 m/día y una transmisividad de $0,78 \text{ m}^2/\text{día}$, características de un medio rocoso con fracturación limitada y baja conectividad hidráulica.

La comparación entre ambos ensayos confirma que, mientras el Pampeano constituye la unidad hidrogeológica de mayor potencial para abastecimiento, la Formación Balcarce actúa como un sistema de baja productividad, altamente condicionado por la presencia puntual de discontinuidades estructurales. Las diferencias observadas se reflejan de manera clara en las curvas de descenso y recuperación obtenidas para ambos pozos (Figura 5).

Modelado del flujo de agua subterránea

El modelo numérico fue calibrado inicialmente en régimen estacionario utilizando los niveles piezométricos medidos en campo. El ajuste obtenido presentó un error medio cuadrático (RMSE) de 0,6 m, equivalente a aproximadamente el 2% del espesor saturado del acuífero Pampeano en el área de estudio, lo que se ha considerado adecuado para la escala del modelo y la resolución de la grilla empleada. La relación entre niveles observados y simulados (Figura 6) mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0,76 y un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0,87, evidenciando un ajuste robusto. El análisis del sesgo indica una leve tendencia a subestimar los niveles simulados, se considera en este caso que no afecta la validez del modelo.

El balance consolidado obtenido durante la calibración refleja una recarga anual de $1.134.540 \text{ m}^3$ y egresos totales de $1.138.772 \text{ m}^3$. Estos últimos se desglosan en $14.600 \text{ m}^3/\text{año}$ por bombeo ($\approx 1,3\%$), $726.360 \text{ m}^3/\text{año}$ por drenaje hacia el humedal ($\approx 63,8\%$) y $397.812 \text{ m}^3/\text{año}$ por evapotranspiración ($\approx 34,9\%$). La variación neta de almacenamiento ($+4.167 \text{ m}^3/\text{año}$) es prácticamente nula, lo que confirma la coherencia entre el modelo conceptual y la simulación. Este balance cuantifica la importancia del humedal y de la evapotranspiración como principales vías de descarga frente a un bombeo relativamente bajo.

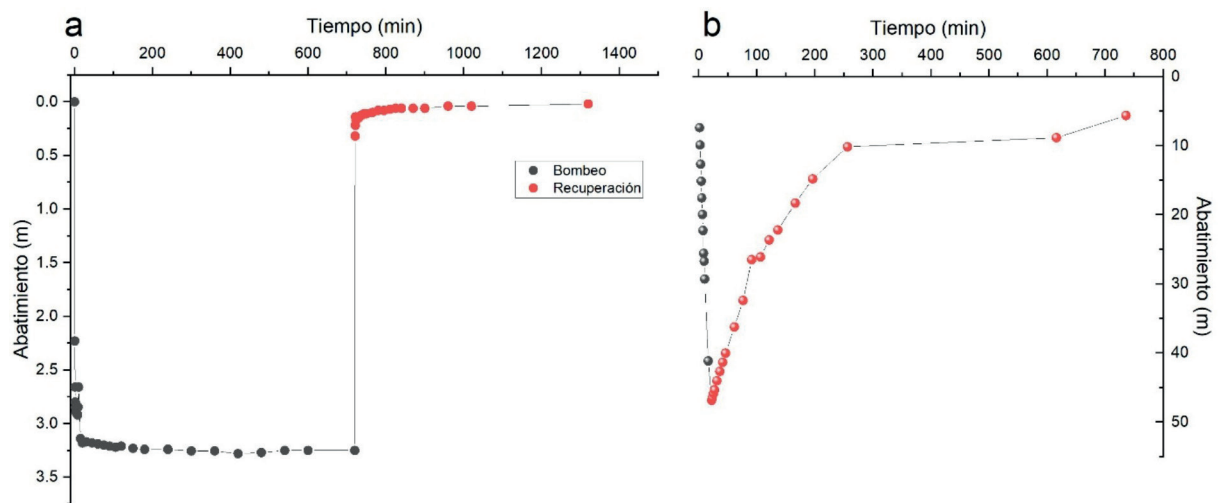


Figura 5. Datos de las pruebas de bombeo y recuperación realizadas en el predio: (a) ensayo en el acuífero Pampeano (pozo G1004), (b) ensayo en la Formación Balcarce (pozo G1005).

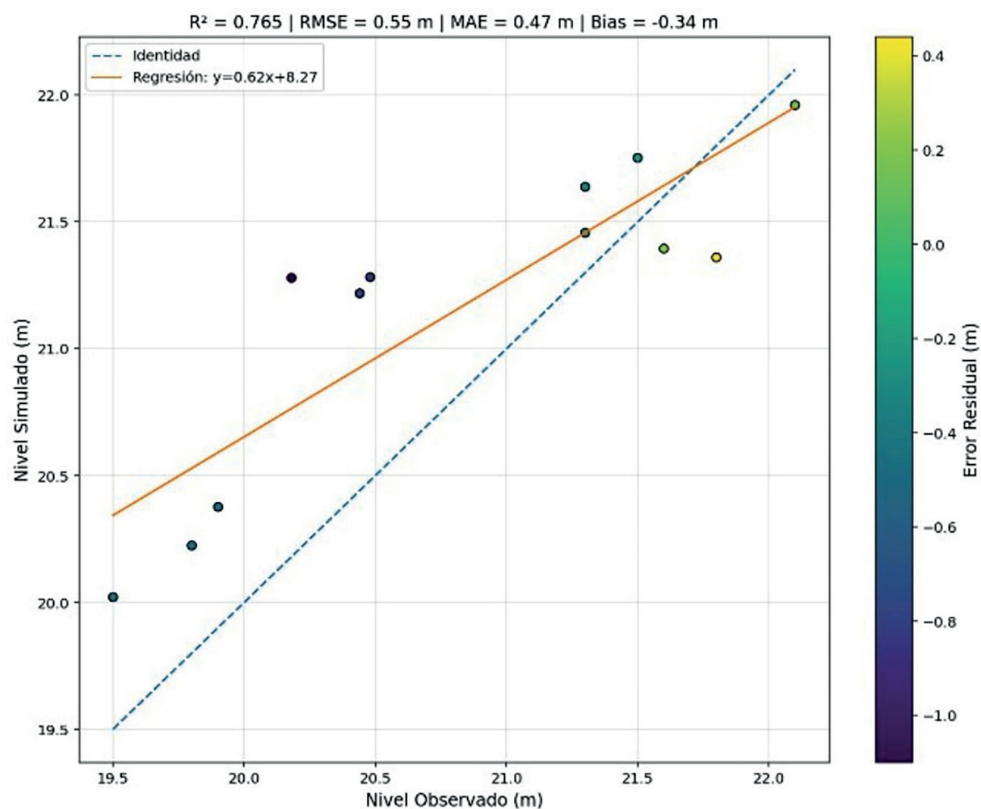


Figura 6. Datos de calibración del modelo estático y ajuste utilizados en este trabajo.

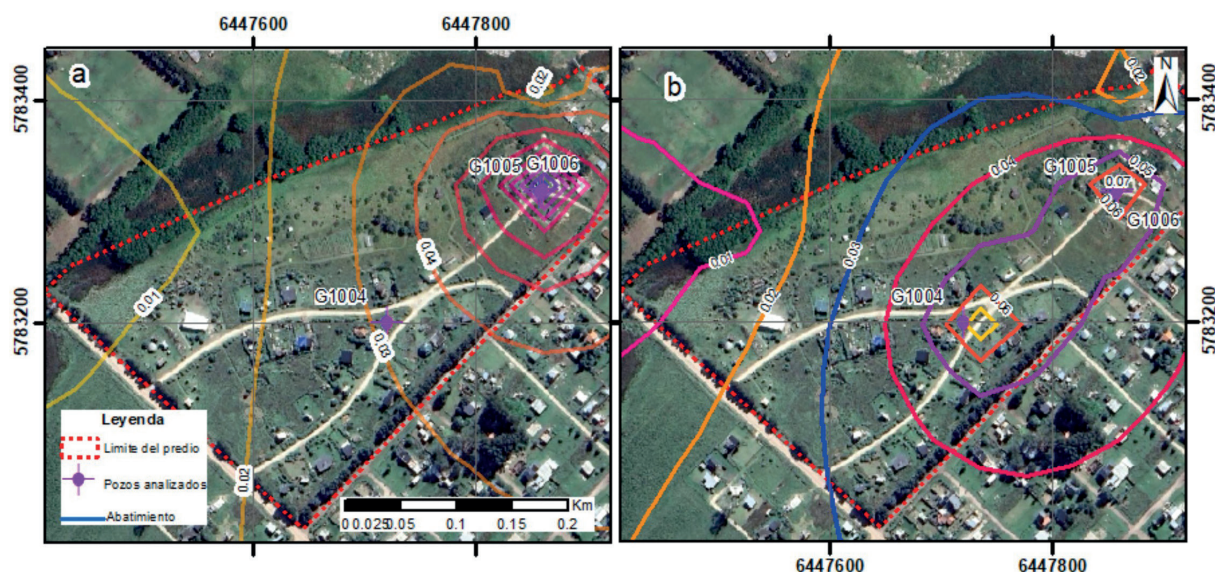


Figura 7. Descenso del nivel freático al cabo de un año de simulación con caudal total de 40 m³/día en el acuífero Pampeano. (a) Escenario de extracción concentrada en un único pozo y (b) escenario de extracción distribuida en dos pozos.

Con el modelo calibrado se desarrolló una simulación en régimen transitorio para un periodo de 12 meses con paso de tiempo mensual, representando una demanda total de 40 m³/día, valor compatible con los requerimientos actuales del predio. Se evaluaron dos esquemas de explotación: (i) extracción concentrada en un único pozo y (ii) extracción distribuida en dos pozos (caudales de 20 m³/día cada uno).

Los mapas piezométricos resultados de dichos modelos se pueden observar en la Figura 7. En ambos casos se generaron conos de descenso al cabo de un año. El escenario de dos pozos mostró un descenso máximo de ~0,07 m, mientras que en el escenario de un solo pozo el abatimiento alcanzó ~0,11 m. Aunque estas variaciones son reducidas en términos absolutos, los perfiles mensuales construidos permiten comparar la extensión de los radios de influencia en cada régimen de explotación y resaltan la ventaja de distribuir la extracción para minimizar impactos localizados.

DISCUSIÓN

El sector periurbano sur de Mar del Plata experimenta desde hace décadas una expansión urbana continua, acompañada por la ausencia de redes municipales de agua potable y alcantarillado. Este contexto incrementó la dependencia sobre el acuífero Pampeano mediante perforaciones individuales (Barilari *et al.*, 2020; Isla *et al.*, 2018), generando una presión creciente sobre un sistema de espesor saturado reducido y capacidad de almacenamiento limitada. La caracterización realizada en este trabajo permite evaluar de manera integrada el funcionamiento local del acuífero Pampeano y caracterizar el comportamiento hidráulico y geoquímico de la Formación Balcarce

a partir de ensayos de bombeo y trazadores, aportando elementos relevantes para la gestión sostenible del recurso.

Los ensayos de bombeo revelaron diferencias muy marcadas entre ambas unidades hidrogeológicas. El acuífero Pampeano mostró descensos moderados, rápida recuperación y parámetros hidráulicos acordes con un medio detrítico libre capaz de sostener caudales domiciliarios típicos. En contraste, la Formación Balcarce presentó un comportamiento claramente restrictivo: su baja transmisividad, la rápida caída del nivel dinámico y la lenta recuperación reflejan un sistema donde la productividad depende casi por completo del desarrollo, continuidad y apertura de fracturas. En consecuencia, su aprovechamiento requiere estudios geofísicos e hidráulicos detallados que permitan identificar zonas con mayor densidad de fracturas, las cuales podrían ofrecer rendimientos puntuales aceptables, aunque con marcada heterogeneidad y limitada sostenibilidad en el tiempo.

Los valores hidráulicos obtenidos en el Pampeano ($T \approx 167 \text{ m}^2/\text{d}$; $K \approx 5,6 \text{ m/d}$) se sitúan dentro del rango reportado para el piedemonte serrano por Silva Busso y Amato (2012), quienes demostraron que las arquitecturas sedimentarias tipo II y IV, combinaciones de limos, arenas finas y niveles gravosos intercalados, presentan transmisividades entre 30 y más de $500 \text{ m}^2/\text{d}$ según el grado de continuidad y espesor de los cuerpos permeables. Esta variabilidad lateral, típica de los depósitos periserranos, explica la respuesta hidráulica moderadamente favorable observada en el pozo G1004 y confirma que el Pampeano puede sostener caudales domiciliarios cuando los niveles arenosos son continuos y suficientemente potentes. Por el contrario, la baja transmisividad estimada para la Formación Balcarce ($\approx 0,78 \text{ m}^2/\text{d}$) concuerda plenamente con lo descrito para los acuíferos fisurados del basamento en el mismo estudio, caracterizados por caudales específicos bajos, rápida caída del nivel dinámico y una fuerte dependencia de la conectividad de fracturas. Estos antecedentes regionales refuerzan que la productividad limitada observada en el pozo G1005 responde a un comportamiento hidrogeológico intrínseco del basamento y no a condiciones operativas particulares del ensayo.

El análisis hidroquímico e isotópico refuerza esta interpretación y coincide con lo documentado por Galli *et al.* (2017) para la región de Mar del Plata, donde las muestras de los acuíferos Pampeano y Balcarce se agrupan con señales isotópicas similares. Este comportamiento indica que la Formación Balcarce no tiene un sistema de recarga independiente, sino que recibe agua infiltrada en el Pampeano que migra hacia profundidad a través de fracturas. En este caso, la mayor conductividad eléctrica y las concentraciones relativamente más elevadas de cloruros observadas en G1005 sugieren tiempos de residencia más prolongados o una circulación más lenta en el medio rocoso, pero sin modificar de manera significativa su firma isotópica. Esta combinación, isotopía equivalente pero mayor evolución hidroquímica, es coherente con un sistema fracturado de baja renovación, alimentado

principalmente por flujos descendentes desde el acuífero Pampeano y condicionado por la geometría y conectividad de las discontinuidades.

Desde el punto de vista isotópico, las muestras del predio presentan un ligero enriquecimiento respecto de la LMWL, lo que sugiere la posible influencia de evaporación previa a la infiltración o la mezcla con aguas superficialmente evaporadas. El humedal, en cambio, muestra un enriquecimiento isotópico mucho más marcado, coherente con procesos de evapoconcentración en un cuerpo de agua somero. Si bien se dispone de un único valor de conductividad eléctrica para este humedal, su magnitud, similar a la del Pampeano y sin evidencia de salinización extrema, indica que el enriquecimiento isotópico no responde a un aumento significativo de solutos, sino predominantemente a evaporación. No puede descartarse que, bajo determinadas condiciones hidrológicas, este humedal actúe como fuente de recarga localizada hacia el acuífero Pampeano, aportando agua isotópicamente enriquecida y contribuyendo al patrón observado en los pozos del predio. Esta posibilidad, aunque no concluyente, destaca la necesidad de considerar la interacción humedal-acuífero al interpretar la señal isotópica local y al evaluar los gradientes hidráulicos bajo distintos esquemas de explotación.

El modelo numérico de flujo subterráneo permitió validar de manera cuantitativa el modelo conceptual propuesto para el acuífero Pampeano, mostrando un ajuste satisfactorio entre niveles simulados y observados y reproduciendo adecuadamente la influencia del humedal como principal zona de descarga bajo condiciones hidrológicas promedio. Dado que la Formación Balcarce actúa como basamento hidráulico en la simulación, el modelo refleja con claridad la dinámica del Pampeano ante distintos regímenes de extracción. Los escenarios evaluados indican que la operación de un único pozo genera conos de abatimiento más profundos y extensos, mientras que la distribución del bombeo en dos pozos reduce tanto la amplitud como la propagación lateral de los descensos. Si bien el humedal funciona típicamente como un dren del sistema, es importante considerar que durante episodios de precipitaciones extremas o bajo condiciones de bombeo intensivo en época estival, podrían invertirse localmente los gradientes hidráulicos, permitiendo que el humedal actúe transitoriamente como zona de recarga hacia el acuífero Pampeano. Aunque los 40 m³/día simulados superan la demanda actual del predio, los resultados permiten anticipar el comportamiento del sistema frente a posibles incrementos de extracción y muestran que la distribución espacial del bombeo constituye una estrategia más eficiente y menos perturbadora para un acuífero de espesor saturado reducido.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman la baja productividad hidráulica de la Formación Balcarce y su fuerte dependencia del desarrollo y conectividad de las fracturas, lo que limita su aprovechamiento como fuente principal de abastecimiento. No obstante, tal como sugieren los antecedentes regionales (Galli *et al.*, 2017; Martínez *et al.*, 2014), su inter-

conexión con el acuífero Pampeano indica que podría aportar volúmenes puntuales de agua bajo condiciones estructurales favorables, aunque ello requiere estudios geofísicos e hidráulicos específicos. En contraste, el Pampeano constituye el recurso estratégico dominante en el sector periurbano sur de Mar del Plata, pero su escaso espesor saturado y su sensibilidad a perturbaciones, incluida la posible inversión estacional de gradientes y la interacción con cuerpos someros de agua superficial como humedales y arroyos, resaltando la necesidad de prácticas de aprovechamiento controlado. La protección de las áreas de recarga, el monitoreo de niveles y calidad, y la distribución espacial del bombeo surgen como componentes esenciales para asegurar la sostenibilidad del sistema en un escenario de demanda creciente y variabilidad climática.

CONCLUSIONES

La Formación Balcarce mostró un comportamiento hidrogeológico restringido, controlado casi exclusivamente por la presencia, continuidad y apertura de fracturas. Sus parámetros hidráulicos, el descenso rápido del nivel dinámico y la lenta recuperación confirman su baja transmisividad y su limitada capacidad para sostener extracciones continuas. No obstante, y en concordancia con estudios previos (Galli *et al.*, 2017), su señal isotópica indica que recibe recarga desde el acuífero Pampeano, lo que revela una conectividad vertical entre ambas unidades. Su potencial aprovechamiento, por lo tanto, solo sería viable en zonas con fracturación favorable y requiere estudios específicos de mayor detalle.

Las aguas subterráneas del Pampeano y de la Formación Balcarce presentan composiciones isotópicas similares y coherentes con un origen meteorico común. Las diferencias hidroquímicas observadas, particularmente conductividad eléctrica y cloruros más elevados en el pozo profundo, sugieren tiempos de residencia más prolongados o una circulación más lenta en el medio rocoso, sin modificar sustancialmente la firma isotópica. Estos resultados confirman que el agua almacenada en la Formación Balcarce no constituye un sistema independiente, sino un reservorio secundario alimentado por flujos descendentes desde el Pampeano.

El humedal ubicado en el límite norte del predio cumple un rol hidrogeológico estratégico. Bajo condiciones promedio actúa como zona de descarga del acuífero Pampeano, pero durante episodios de precipitaciones extremas o bajo escenarios de bombeo intensivo en verano podría comportarse transitoriamente como zona de recarga, invirtiendo localmente los gradientes hidráulicos y aportando agua isotópicamente enriquecida al sistema. Esta dinámica refuerza la necesidad de integrar el humedal en la gestión hidrogeológica del predio.

El modelo numérico permitió validar el modelo conceptual del acuífero Pampeano y evaluar escenarios de explotación. La distribución de la extracción entre dos pozos mostró una reducción significativa del abatimiento y del radio de influencia en comparación con la operación de un único pozo, constituyendo una estrategia más eficiente y menos perturbadora para un acuífero de baja porosidad y espesor limitado.

En conjunto, los resultados evidencian que la gestión sostenible del recurso requiere: (i) distribuir espacialmente las extracciones, (ii) proteger las zonas de recarga y el humedal asociado, (iii) monitorear niveles y calidad de agua de manera periódica, y (iv) evitar profundizar pozos en la Formación Balcarce sin estudios estructurales e hidráulicos que justifiquen su viabilidad. Estas acciones permitirán sostener el abastecimiento local y reducir la vulnerabilidad frente a aumentos en la demanda y variabilidad climática.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su especial agradecimiento a los vecinos del barrio La Ecomuna por permitir la realización de los ensayos y la toma de muestras en su predio. Asimismo, agradecen al técnico Gustavo Bernava por la ejecución de los análisis químicos. Este estudio fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) mediante el proyecto PICT 1349 y contó, además, con el apoyo económico otorgado por Fondos Williams en el marco de la convocatoria Fondos Complementarios para Proyectos de Investigación con Impacto en el Territorio Argentino 2024. Finalmente, los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por el suministro de datos meteorológicos y el mantenimiento de la estación ubicada en la ciudad de Mar del Plata.

REFERENCIAS

- APHA. 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.
- Auge, M. 2004. *Vulnerabilidad de Acuíferos: Conceptos y Métodos*. Buenos Aires.
- Barilari, A., Quiroz Londoño, M., Paris, M. del C., Lima, M. L. & Massone, H. E. 2020. Groundwater contamination from point sources. A hazard index to protect water supply wells in intermediate cities. *Groundwater for Sustainable Development* 10:100363.
- Bocanegra, E. 1993. Modelación hidrogeoquímica de los procesos de salinización del acuífero de Mar del Plata. En: E. Bocanegra y A. Rapaccini (eds.), *Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. Servicios Gráficos de la Universidad Nacional de Mar del Plata, 349-360.

- Bocanegra, E. 2011. *Estrategias de gestión del acuífero de Mar del Plata. Modelo conceptual y simulación numérica*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Inédita.
- Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. & Cionchi, J. 1993. Exploitation effect and salt water intrusion in the Mar del Plata aquifer, Argentina. In: E. Custodio and A. Galofre (eds.), *Study and modelling of saltwater intrusion into Aquifers*. Proceedings of the 12th SWIM, CIMNE, Barcelona, 177-191.
- Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. y Farenga, M. 2005. Modelación numérica preeliminar del flujo subterráneo de la cuenca del río Quequén, provincia de Buenos Aires. *IV Congreso Argentino de Hidrogeología*. Actas I: 191-200.
- Bocanegra, E. M., Quiroz Londoño, O. M., Grondona, S. y Martinez, D. 2022. Acuíferos costeros explotados intensamente. Modelo conceptual, respuesta hidrodinámica y simulación numérica del acuífero de Mar de Plata. *Revista Argentina de Hidrogeología* 1: 59-77.
- Calmbach, L. 1997. *AquaChem computer code-version 3.7*. 42. Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3L3: Waterloo Hydrogeologic.
- Cingolani, C. 2005. Unidades morfoestructurales (y estructuras menores) de la provincia de Buenos Aires. En: R.E. de Barrio, R.O. Etcheverry, M.F. Caballé y E. Llambías (eds.), *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires*. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino. Cap. II: 21-30.
- Cionchi, J., Mérida, L. y Redín, I. 2000. *La explotación racional de los recursos hídricos subterráneos en el partido de General Pueyrredón (Buenos Aires–Argentina). El caso de obras sanitarias Mar del Plata S.E. Mar del Plata*. 41 pp.
- Duffield, G. M. & Rumbaugh, J. O. 1991. *Aqtesolv*. Aquifer Test Solver Version 1. Geraghty & Miller Inc.
- ESRI. 2006. *ArcGIS 9.2*. Environmental Systems Research Institute Inc Redlands, California.
- Galli, M. , Damons, M. E., Siwawa, S., Bocanegra, E. M., Nel, J. M., Mazvimavi, D. & Martínez, D. E. 2017. Stable isotope hydrology in fractured and detritic aquifers at both sides of the South Atlantic Ocean: Mar del Plata (Argentina) and the Rawsonville and Sandspruit river catchment areas (South Africa). *Journal of South American Earth Sciences* 73: 119-129.
- Gonfiantini, R. 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* 271(5645): 534-536.
- Gutiérrez, J. D. G., Romanelli, A., Esquius, K. S., Domínguez, S., Martínez, D. & Londoño, O. M. Q. 2026. Tracking nitrate contamination in groundwater from a residential Peri-urban area in Mar del Plata city (Argentina) using isotopic, hydrogeochemical and microbiological tracers. *Journal of Environmental Management* 406: 129705.

- Isla, F. I., Quiroz Londoño, O. M. & Cortizo, L. C. 2018. Groundwater characteristics within loessic deposits: the coastal springs of Los Acatilados, Mar del Plata, Argentina. *Environmental Earth Sciences* 77(17): 610.
- Lis, G., Wassenaar, L. I. & Hendry, M. J. 2008. High-precision laser spectroscopy D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements of microliter natural water samples. *Analytical chemistry* 80(1): 287-293.
- Mahlknecht, J., González-Bravo, R. & Loge, F. J. 2020. Water-energy-food security: A Nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy* 194: 116824.
- Martínez, D. & Bocanegra, E. 2002. Hydrogeochemistry and cation-exchange processes in the coastal aquifer of Mar Del Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal* 10(3):393-408.
- Martínez, D., Quiroz Londoño, O. y Grondona, S. 2014. Variabilidad temporal y en profundidad de isótopos estables en muestras someras de agua subterránea. *III Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie*. Mar del Plata.
- Massone, H., Martinez, D., Quiroz Londoño, O., Tomas, M., Ferrante, A., Bernasconi, V. y Farenga, M. 2008. Prospección geoelectrica con fines hidrogeológicos en la cuenca Sur del Partido de General Pueyrredón, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología* 6: 57-68.
- Mérida, L. 2002. La evolución de la intrusión salina en el acuífero marplatense. Ejemplo de una gestión sustentable. *Groundwater and human development* 841-850.
- Pool, M., Carrera, J., Alcolea, A. & Bocanegra, E. 2015. A comparison of deterministic and stochastic approaches for regional scale inverse modeling on the Mar del Plata aquifer. *Journal of Hydrology* 531(1):214-229.
- Quiroz Londoño, O. M., Martinez, D. E. y Massone, H. E. 2012. Evaluación comparativa de métodos de cálculo de recarga en ambientes de llanura. La llanura interserrana bonaerense (argentina), como caso de estudio. *Dyna* 79(171): 239-247.
- Quiroz Londoño, O. M., Gomez Gutierrez, J. D. y Martinez, D. E. 2023. Tendencias de recarga del Acuífero Pampeano en la Llanura Interserrana bonaerense: un análisis de 17 años. *Revista Argentina de Hidrogeología* 2: 45-57.
- Quiroz Londoño, O. M., Romanelli, A., Durán Quesada, A. M., Gómez Gutiérrez, J. D., Vélez Agudelo, C., Miglioranza, K., Kracht, O. & Martinez, D. E. 2025. Moisture sources and rainfall water stable isotopes during the recent triple-dip La Niña in coastal Argentina. *Hydrological Sciences Journal* 70(10): 1645-1661. <https://doi.org/10.1080/002626667.2025.2497878>

- Quiroz-Londoño, O. M., Martínez, D. y Massone, H. 2012. Estimación de recarga de acuíferos en ambientes de llanura con base en variaciones de nivel freático. *Tecnología y ciencias del agua* 3(2): 123-130.
- Ruiz de Galarreta, A., Varni, M., Banda Noriega, R. y Barranquero, R. 2007. Caracterización geohidrológica preliminar en la cuenca del arroyo Langueyú, Partido de Tandil, Buenos Aires. *V Congreso Argentino de Hidrogeología* 119-128.
- Schirmer, M., Leschik, S. & Musolff, A. 2013. Current research in urban hydrogeology—A review. *Advances in Water Resources* 51: 280-291.
- Silva Busso, A. A. y Amato, S. D. 2012. Aspectos hidrogeológicos de la región periserrana de Tandilia (Buenos Aires, Argentina). *Boletín Geológico y Minero* 123(1): 27-40.
- Team, q. D. 2020. *Sistema de Información Geográfica qgis*.
- Teruggi, M. y Kilmurray, J. 1975. Tandilia. *Relatorio 6º Congreso geológico Argentino* 55- 77.
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38(1): 55-94.
- Varni, M., Usunoff, E., Weinzettel, P. & Rivas, R. 1999. Groundwater recharge in the Azul aquifer, central Buenos Aires province, Argentina. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 24(4): 349-352.
- Winston, R. B., 2009. ModelMuse: a graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* 6-A29, 52 p.