





Fundación
Miguel Lillo
Tucumán
Argentina

doi

Recarga, recurso y reservas hídricas subterráneas en un valle intermontano del Sistema de Ventania (Buenos Aires, Argentina)

Groundwater recharge, resources and storage in an intermontane valley of the Ventania System (Buenos Aires Province, Argentina)

Matías REY^{1,2*} , Andrés G. RUFFO^{1,2} 

¹ CONICET. Cam. de la Carrindanga Km. 7, (B8000) Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

² Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur. San Juan 670, (B8000) Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

* Autor de contacto: <matias.rey@uns.edu.ar>

Resumen

La información hidrogeológica en sectores serranos e intermontanos del sudoeste bonaerense es limitada, a pesar del creciente desarrollo urbano y turístico del área. En este trabajo se cuantifican la recarga, el recurso y las reservas hídricas subterráneas en la localidad de San Andrés de la Sierra (partido de Tornquist, provincia de Buenos Aires), mediante un enfoque que combina el cálculo de la recarga y recurso subterráneo con un balance hídrico de paso diario, y prospección geoelectrica para la determinación de espesores saturados y el posterior cálculo de las reservas hídricas subterráneas. Las características hidrogeológicas y los espesores acuíferos se definieron mediante diez sondeos eléctricos verticales y una tomografía de resistividad eléctrica, interpretados en conjunto con datos de recortes de pozos y mediciones del nivel freático. Los resultados indican una recarga media anual de 137,4 mm, equivalente al 15,2% de la precipitación anual, lo que representa un recurso hídrico potencial de 0,40 hm³/año para el área estudiada. El espesor saturado del acuífero presentó una marcada heterogeneidad, con un valor promedio de 68 m y un máximo de 135 m, incluyendo un nivel arcilloso interdigitado

► Ref. bibliográfica: Rey, M.; Ruffo, A. G. 2026. "Recarga, recurso y reservas hídricas subterráneas en un valle intermontano del Sistema de Ventania (Buenos Aires, Argentina)". *Acta Geológica Lilloana* 37 (1): 1-21. DOI: <https://doi.org/10.30550/j.agl/2341>

► Recibido: 19 de diciembre 2025 – Aceptado: 25 de febrero 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.



de carácter acuitado. Mediante la modelización espacial del basamento hidrogeológico y la superficie freática, se estimaron las reservas hídricas subterráneas disponibles en 29,50 hm³. Estos resultados constituyen una base técnica fundamental para la planificación territorial y el manejo sostenible del acuífero local.

Palabras clave: Hidrogeología, agua subterránea, prospección, sondeo eléctrico vertical, tomografía de resistividad eléctrica, San Andrés de la Sierra.

Abstract

Hydrogeological information in the mountainous and intermontane sectors of southwestern Buenos Aires Province is limited, despite the recent urban and tourism-related growth in the area. This study estimates groundwater recharge, resources, and storage in the locality of San Andrés de la Sierra (Tornquist district, Buenos Aires Province) using an integrated approach that combines daily water-soil balance calculations to quantify recharge and groundwater resources, together with geoelectrical prospecting to determine saturated thicknesses and subsequently estimate groundwater reserves. Hydrogeological characteristics and aquifer thicknesses were defined through ten vertical electrical soundings and one electrical resistivity tomography, interpreted jointly with borehole cuttings and water-table measurements. Results indicate a mean annual recharge of 137,4 mm (15,2% of annual precipitation), representing a potential groundwater resource of 0,40 hm³/year for the study area. The saturated thickness of the aquifer shows marked heterogeneity, with an average of 68 m and a maximum of 135 m, including an interdigitated clay layer acting as an aquitard. Spatial modelling of the hydrogeological basement and the water table allowed estimating available groundwater reserves at 29,50 hm³. These findings provide an essential technical basis for territorial planning and the sustainable management of the local aquifer.

Keywords: Hydrogeology, groundwater, prospecting, vertical electrical sounding, electrical resistivity tomography, San Andrés de la Sierra.

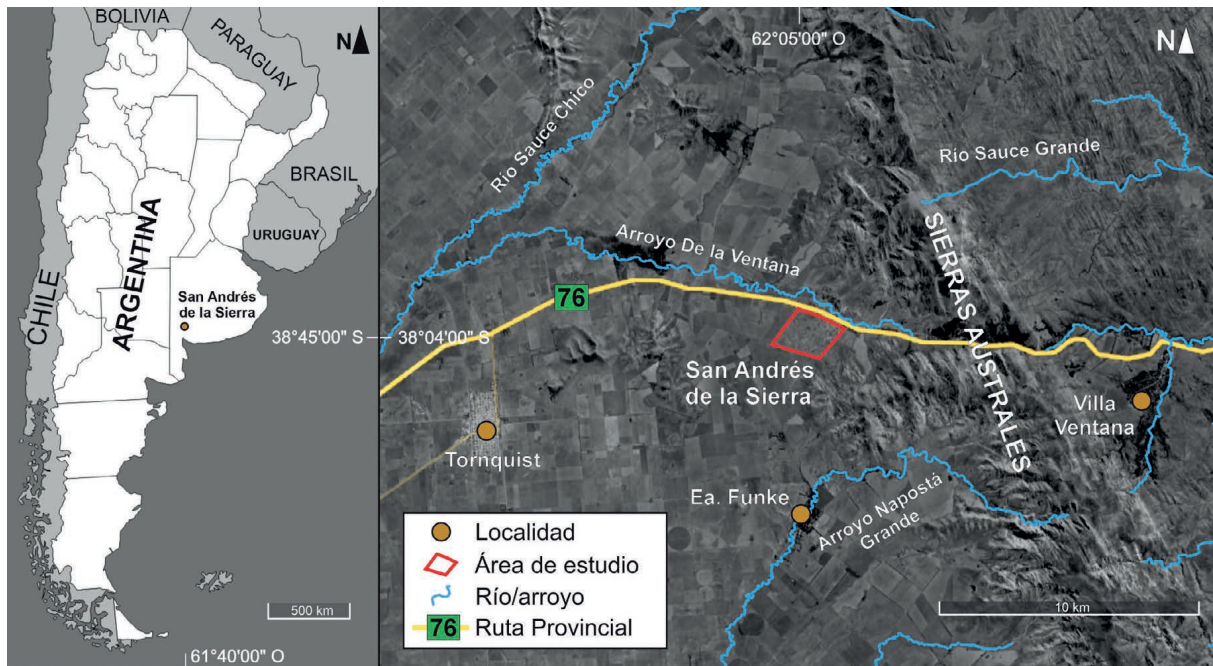
INTRODUCCIÓN

La disponibilidad y gestión sostenible del agua subterránea constituye uno de los desafíos ambientales y socioeconómicos más relevantes a nivel global, especialmente en regiones donde los recursos superficiales son escasos o altamente variables (UNESCO/WWAP, 2022; Mukherjee *et al.*, 2024). Actualmente, a nivel mundial, alrededor del 50% del agua utilizada para consumo humano, riego y actividades productivas proviene de acuíferos, cuya explotación se ha intensificado en un contexto de crecimiento poblacional, mayor demanda agrícola y variabilidad climática (Scanlon *et al.*, 2023; Kuang *et al.*, 2024). Esto ha llevado a que numerosos acuíferos del mundo se encuentren sometidos a presiones significativas, evidenciando descensos de nivel y deterioro en la calidad del agua (Jasechko *et al.*, 2024).

En Argentina, el recurso hídrico subterráneo constituye la principal fuente de abastecimiento para poblaciones rurales, actividades agrícolas y desarrollos turísticos (Kruse, 2015). Sin embargo, en numerosos sectores serranos y pedemontanos persisten importantes áreas con escasa información hidrogeológica, especialmente donde la complejidad estructural y la heterogeneidad sedimentaria dificultan la caracterización de los sistemas acuíferos. Esta falta de información limita la capacidad de los gestores y tomadores de decisiones para planificar el uso del recurso hídrico subterráneo y afrontar escenarios de variabilidad climática y población en crecimiento.

El valle intermontano donde se ubica San Andrés de la Sierra constituye un ejemplo de estos ambientes, donde la infiltración de las precipitaciones locales alimenta un acuífero freático alojado en depósitos coluviales y aluviales. En este contexto, la utilización de métodos indirectos, como la prospección geoelectrica y metodologías de estimación de recarga, constituyen herramientas de gran utilidad, en sectores donde las perforaciones son escasas (Hasan y Sang, 2022; Nouradine *et al.*, 2024; Afridi *et al.*, 2025; Sendrós *et al.*, 2025), reduciendo la incertidumbre asociada a la heterogeneidad del medio.

El objetivo de este trabajo es estimar la recarga, el recurso y las reservas hídricas subterráneas en la localidad de San Andrés de la Sierra. Para ello se plantea un enfoque integrado que combina la aplicación de un balance de agua en el suelo de paso diario, para determinar la recarga y el recurso hídrico subterráneo, y la determinación del basamento hidrogeológico y los espesores acuíferos mediante sondeos eléctricos verticales y tomografía de resistividad eléctrica para la estimación del volumen de reservas hídricas subterráneas. Los resultados obtenidos constituyen una base fundamental para la gestión sostenible del acuífero, aportando la primera información de este tipo para el sector.



■ **Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de San Andrés de la Sierra, ubicada en el partido de Tornquist, se encuentra en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, dentro del sector occidental del Sistema de Ventania (Sierras Australes) (Figura 1). Está situada sobre la Ruta Provincial 76, a aproximadamente 16 km de la ciudad de Tornquist.

Geomorfológicamente, el sector muestra un relieve general escalonado, con alturas que disminuyen desde las sierras hacia los valles. En las zonas de piedemonte son comunes las lomas alineadas paralelamente a las curvas de nivel; estas delimitan campos aterrizados utilizados para la producción agrícola, como adaptación a la erosión del suelo generada por el escurrimiento proveniente de áreas rocosas con pendientes pronunciadas. Según la clasificación propuesta por González Uriarte (2002), dentro del positivo de Ventania se distinguen dos unidades geomorfológicas principales: el Sistema Serrano (SS) y el Nivel de Planación General (NPG). En el primero, los controles estructurales permiten diferenciar dos unidades subordinadas: Sierras y Cerros, y Valles Intermontanos. Estos últimos presentan pendientes del orden del 8–12%, lo que da lugar a escurrimientos intermitentes de alta energía que pierden definición aguas abajo al ser cubiertos por depósitos coluviales. El área de estudio corresponde a uno de estos valles intermontanos, ubicado sobre el margen oriental de la cuenca del río Sauce Chico. La cota topográfica de menor altura del sector estudiado se ubica en su extremo noroeste (390 msnm), mientras que el punto más elevado se encuentra en el extremo sudeste (440 msnm).

En términos generales, el clima en la zona de estudio es templado subhúmedo serrano. La temperatura media anual es de 14° C y muestra estaciones térmicas bien diferenciadas, con veranos e inviernos rigurosos y primaveras y otoños intermedios (Campo de Ferreras *et al.*, 2004). Diversos autores (Harrington, 1947; Paoloni *et al.*, 1988; Carrica, 1998) han señalado el fenómeno de lluvia orográfica que ejerce el sistema serrano, observando un patrón de distribución regional de la precipitación con gradientes pluviométricos decrecientes desde el sistema serrano hacia la llanura circundante, determinando de esta manera, una situación climática local con valores medios superiores respecto a su entorno regional. De acuerdo a la serie de precipitación más extensa disponible (1888-1998), en la Estancia Hogar Funke el promedio de precipitaciones resulta de 727 mm/año. Considerando datos más recientes de la localidad de Tornquist (1982-2024), estos arrojan un promedio de 771 mm/año. En lo que respecta a la evapotranspiración potencial (ETP), de acuerdo a cálculos propios utilizando el software CROPWAT (FAO, 2008), la ETP promedio es de 1152 mm/año (Tabla 1), en base a los datos de temperatura Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el período 1991-2020 de la localidad anteriormente mencionada.

Tabla 1. Evapotranspiración potencial (ETP) media mensual y anual para el área de estudio.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
ETP (mm)	176	139	116	72	46	32	33	50	72	104	137	174	1152

GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Los afloramientos más antiguos del área, que conforman el basamento hidrogeológico del sector, están constituidos por las rocas paleozoicas de los Grupos Ventana y Pillahuincó (Harrington, 1947). Estas unidades están compuestas por esquistos, cuarcitas, diamictitas, conglomerados y areniscas (Figura 2).

Los niveles superiores de las rocas metamórficas presentan cierta fracturación local, que le otorgarían propiedades acuíferas limitadas. Sin embargo, el grado de interconexión entre las mismas y su persistencia en profundidad es incierta.

Regionalmente, los términos superiores de la columna sedimentaria corresponden a los denominados sedimentos pampeanos (Sala, 1975), depósitos de características loésicas, ampliamente distribuidos y portadores del acuífero freático del sector. En el piedemonte serrano se asignan a la Formación La Norma (De Francesco, 1992a), compuesta por limolitas eólicas loésicas de color castaño rojizo y localmente intercaladas con niveles psefíticos y arenas fluviales. Estos suelen culminar en un nivel de tosca de espesor variable, que puede alcanzar los 3 m. La unidad descansa sobre las rocas paleozoicas o sobre productos de su alteración.

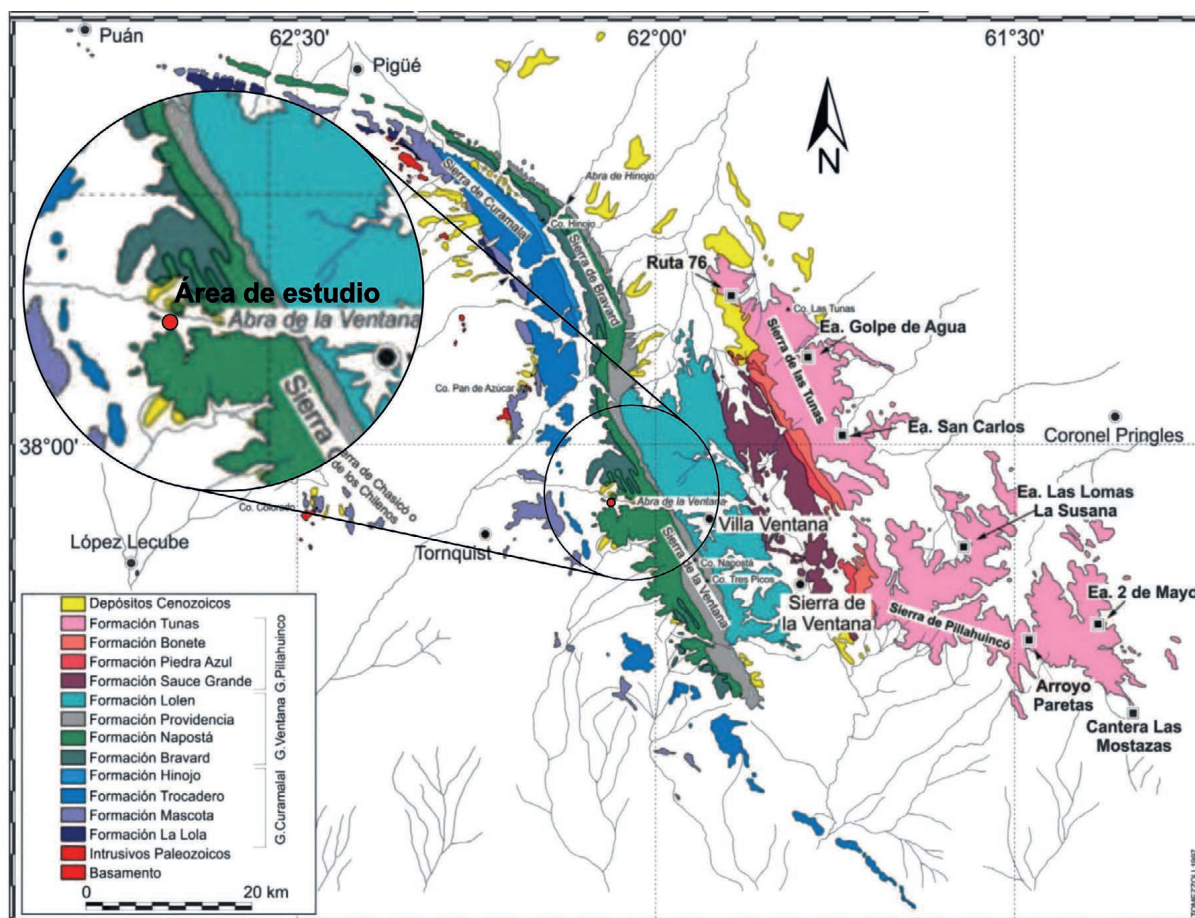


Figura 2. Mapa geológico de las Sierras Australes (modificado de Arzadún *et al.*, 2014) y zoom a los alrededores del área de estudio (señalada con un círculo rojo).

Perfiles litológicos relevados en pozos excavados en el piedemonte, muestran a partir de 5–6 m de profundidad, un paquete de pefitas con abundantes bloques cuarcíticos de hasta 50 cm dentro de una matriz arenosa y que alojan el acuífero freático. Estos depósitos corresponden a la Formación del Águila (De Francesco, 1992b), de edad Pleistocena temprana a media, con espesores muy variables (desde nulos hasta más de 30 m). En los bajos topográficos y valles, estas unidades son cubiertas por sedimentos limo-arenosos de color pardo claro a rojizo, débilmente arcillosos, asignados a la Formación Saavedra (De Francesco, 1992a), de edad Holocena.

La heterogeneidad depositacional de estas formaciones genera anisotropías hidrolíticas locales, con la presencia de niveles alternantes acuíferos y acuitardos, conformando un sistema multicapa apoyado sobre el basamento. No obstante, desde un punto de vista hidrogeológico, el conjunto sedimentario funciona como un sistema relativamente homogéneo en cuanto a la transmisión de agua.

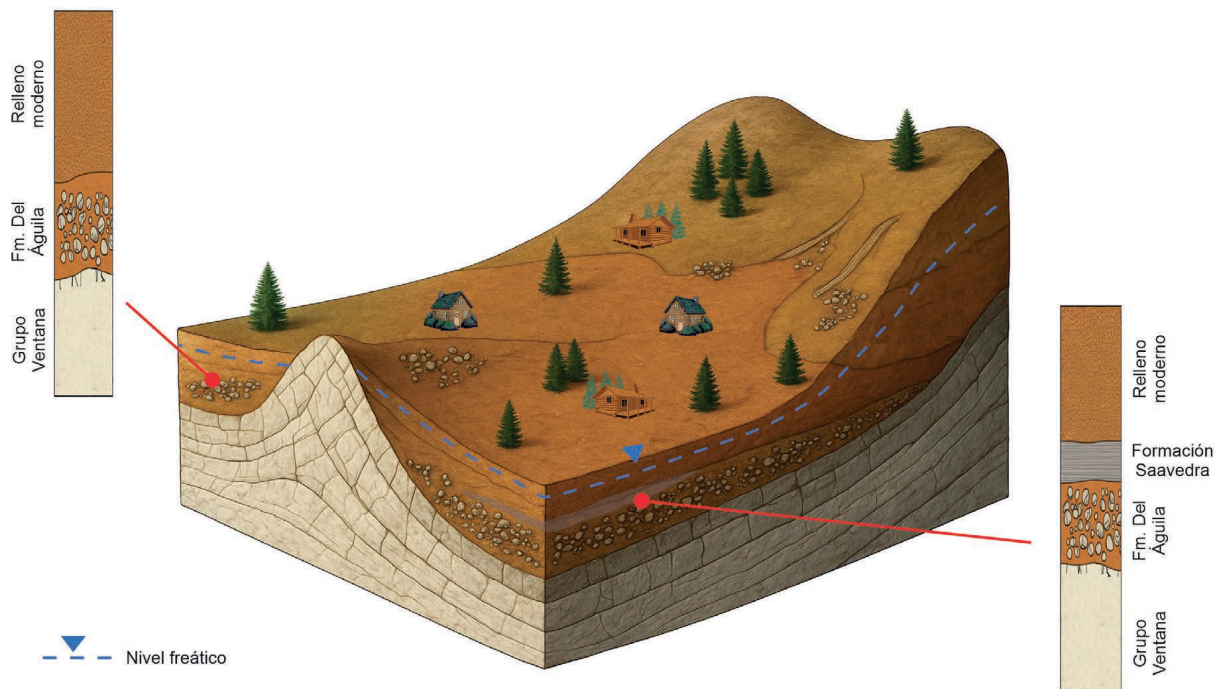


Figura 3. Block esquemático de la geología y rasgos estructurales principales de San Andrés de la Sierra. Se presentan las variaciones litológicas reconocidas localmente (no a escala).

En el ámbito local, el valle donde se sitúa San Andrés de la Sierra se desarrolla sobre un abanico coluvial–aluvial de pendiente suave, limitado por afloramientos cuarcíticos de las Formaciones Napostá y Bravard (Grupo Ventana). Sobre estas rocas se disponen depósitos arenoso–limosos y conglomerádicos de granulometría variable, equivalentes locales de la Formación del Águila, cubiertos por rellenos sedimentarios modernos. En el sector centro–sureste se reconoce, además, un paquete arcilloso discontinuo de 5 a 20 m de espesor, correlacionable con la Formación Saavedra y cubierto por los depósitos actuales (Figura 3).

El acuífero freático en el área estudiada se aloja en los sedimentos coluviales–aluviales del piedemonte, apoyados sobre el basamento metamórfico de la Formación Napostá. Según el censo de pozos realizado, la profundidad al nivel freático varía entre 8 y 25 m, siendo más profundo hacia el sudeste y más somero en las proximidades de la Ruta Provincial 76. El flujo subterráneo sigue de manera general el gradiente topográfico, con dirección predominantemente SSE–NNO.

Conceptualmente, el agua subterránea en el área de estudio es el resultado de la rápida infiltración del agua de lluvia en las laderas de piedemonte. De esta manera, su corto recorrido en el subsuelo, sumado a la composición de los sedimentos, permite presuponer que sus características químicas deberían ser asimilables a las de agua dulce de buena calidad fisicoquímica, lo cual se refleja en las conductividades eléctricas medidas in-situ, con un valor promedio del orden de 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar, se recopilaron datos hidrometeorológicos, información bibliográfica y datos de estudios antecedentes disponibles del sector y áreas cercanas, para la caracterización climática, geológica e hidrogeológica del área de estudio. Posteriormente en campo, se llevó a cabo un censo de puntos de agua. Durante dicho recorrido, se observó que la mayoría de las captaciones se encontraban cerradas de tal forma que imposibilitaban la lectura de nivel. De esta manera, se censaron los únicos 8 puntos accesibles, dentro del ejido de la localidad e inmediaciones, donde se midió la profundidad al nivel freático mediante una sonda freatimétrica OTT de 50 m y una sonda Solinst P102 de 25 m, para luego, determinar la piezometría en el sector. Se efectuaron además mediciones in-situ de conductividad eléctrica, temperatura y pH con una sonda multiparamétrica Lutron WA-2015, mientras que los puntos fueron georreferenciados mediante un GPS Garmin e-Trex Vista.

El cálculo de la recarga de agua al acuífero y, subsecuentemente, el cálculo del recurso hídrico subterráneo, para la superficie estudiada, se llevó a cabo mediante un balance de agua en el suelo de paso diario para el período 1982-1995, mediante el software BALSHORT V3 (modificado de Carrica, 1993). Como datos de entrada, reflejando las condiciones naturales del sitio, se utilizaron: la precipitación diaria disponible para la localidad de Tornquist, la ETP mensual calculada mediante el software CROPWAT (asumiendo la simplificación propuesta por Forte Lay y Burgos, 1983; donde el valor diario de ETP se considera constante para cada día del mes y resulta de dividir la ETP mensual por el número de días), la humedad del suelo, para la cual se consideró una reserva de agua útil de 110 mm/m de acuerdo a los datos disponibles para los suelos de la zona (Carrica, 1998; Lizzi *et al.*, 2007), textura del mismo (ingresada como suelo limoso) y una cobertura vegetal de pastos de 30 cm de altura (con una capacidad máxima de retención de 5 mm). A partir de esto se calculan la ETR y los excesos hídricos, asimilables a la recarga.

En cuanto al cálculo de las reservas hídricas subterráneas, en primer lugar, se llevaron a cabo 10 sondeos eléctricos verticales (SEVs) y 1 tomografía de resistividad eléctrica (TRE), distribuidos en el área de estudio, para determinar las características resistivas del subsuelo en el área (Tabla 2) y los espesores acuíferos de interés. Las operaciones anteriormente mencionadas se realizaron mediante un resistivímetro modelo ARES marca GF Instruments.

Tabla 2. Aperturas de ala/longitudes de los estudios geoelectrónicos.

Nombre	Apertura de ala (AB/2) / Longitud (m)	Coordenadas geográficas
SEV1	320	38° 03'36.5"S, 62° 04'58.2"O
SEV2	400	38° 03'52.9"S, 62° 04'03.4"O
SEV3	320	38° 04'28.1"S, 62° 04'59.9"O
SEV4	400	38° 04'11.4"S, 62° 04'31.6"O
SEV5	400	38° 04'10.5"S, 62° 05'13.6"O
SEV6	400	38° 04'21.3"S, 62° 05'36.1"O
SEV7	320	38° 04'03.9"S, 62° 05'38.9"O
SEV8	160	38° 03'56.5"S, 62° 04'46.9"O
SEV9	160	38° 03'42.0"S, 62° 05'15.8"O
SEV10	250	38° 04'21.0"S, 62° 04'22.5"O
TRE1	235	38° 03'42.6"S, 62° 04'39.2"O

Estos métodos se basan en hacer circular una corriente inducida, midiendo la diferencia de potencial entre electrodos hincados en el terreno. Con estas técnicas se obtiene una “resistividad aparente”, que posteriormente, mediante el procesamiento y la inversión de los datos utilizando un software específico, arroja como resultado un modelo de “resistividades verdaderas”. La respuesta del modelo propuesto debe ajustarse al conocimiento geológico/hidrogeológico de la zona. La parametrización del mismo se realizó utilizando toda la información complementaria disponible, entre la que se destaca las descripciones de recortes de perforaciones (cutting), medidas de profundidad del nivel freático, salinidad del agua, información antecedente de la zona, etc.

Los SEV realizados contaron con una apertura de ala máxima (AB/2) de hasta 400 m, hasta que fue detectado el basamento hidrogeológico, y una disposición eléctrica (AMNB) tipo Schlumberger, proporcionando un dato puntual (1D) en el centro del arreglo. Esta metodología posee un error asociado de alrededor de 10%, inherente al método. En el lugar de trabajo se procedió a la construcción de una “curva de resistividad aparente” en función del espaciamiento entre los electrodos de corriente (AB), los cuales se disponen alineados y en forma simétrica a partir del centro del dispositivo. Los valores de resistividad aparente obtenidos en campo y medidos en ohm.m ($\Omega.m$) se tabularon para ser representados en un gráfico de coordenadas logarítmicas en función de AB/2 expresados en metros (Figura 4). Utilizando el software SEVS (Nigro y Perdomo, 2017) y el método de Zohdy (1989), se realizó la inversión de los datos, obteniendo así una solución única de distribución vertical de resistividades verdaderas y el espesor de cada capa.

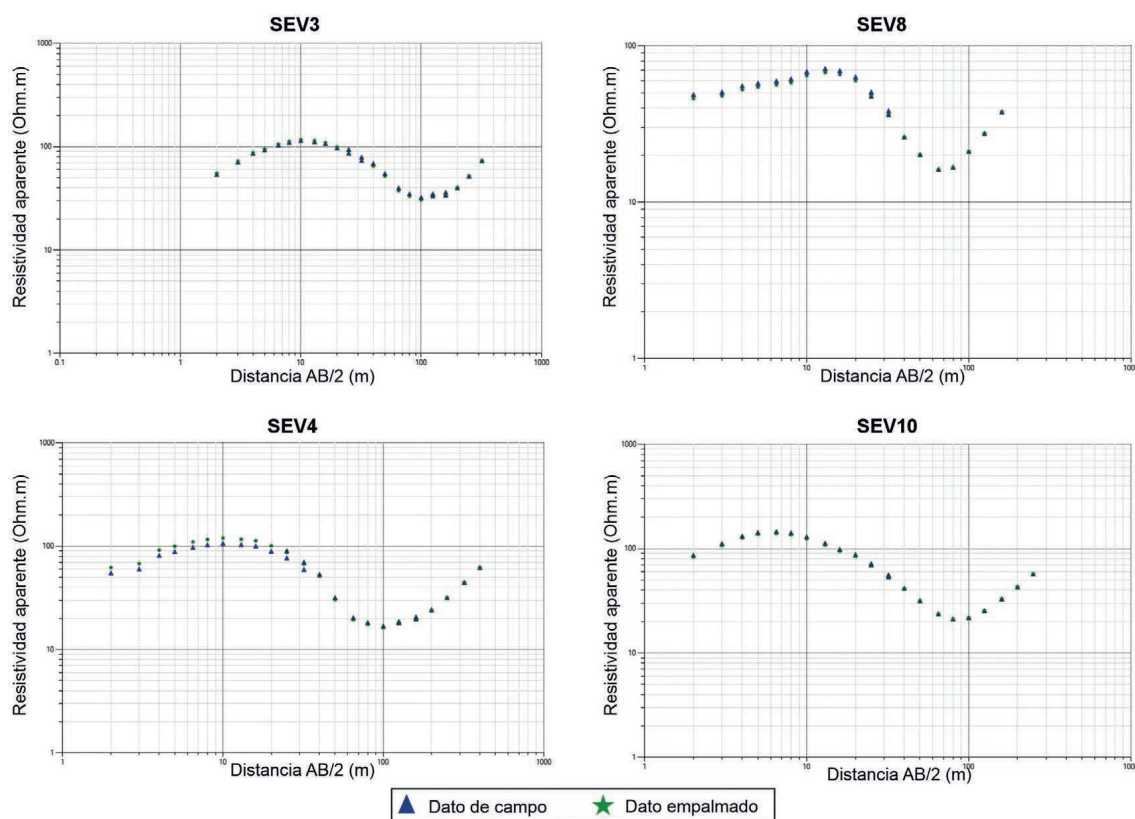


Figura 4. Curvas de resistividad aparente típicas de algunos de los SEV realizados en la zona de estudio. De acuerdo a experiencias previas en la zona, los últimos puntos de medición, que muestran una tendencia ascendente con una pendiente de aproximadamente 45° , indican que la profundidad de investigación alcanzó el basamento hidrogeológico.

Adicionalmente, se llevó a cabo una TRE en sentido N-S, utilizando un arreglo de 48 electrodos mediante una configuración electródica Schlumberger, con una distancia entre electrodos de 5 m, totalizando así una progresiva (distancia entre el primer y el último electrodo) de 235 m y alcanzando una profundidad de investigación de aproximadamente 45 m. La inversión de los datos de campo fue llevada a cabo mediante el software Res2DInv (Loke, 2004), obteniendo un error cuadrático medio (RMS) de 0,63% luego de 7 iteraciones. Este programa aplica el método de inversión por mínimos cuadrados Gauss–Newton (Sasaki, 1992), sujeto a un criterio de suavizado, y determina automáticamente los parámetros óptimos de inversión para cada conjunto de datos. Asimismo, debido a las variaciones de resistividad medidas en superficie, se utilizó la opción “Model Refinement”, que reduce el ancho de celda a la mitad del espaciamiento entre electrodos con el fin de mejorar la resolución del modelo.

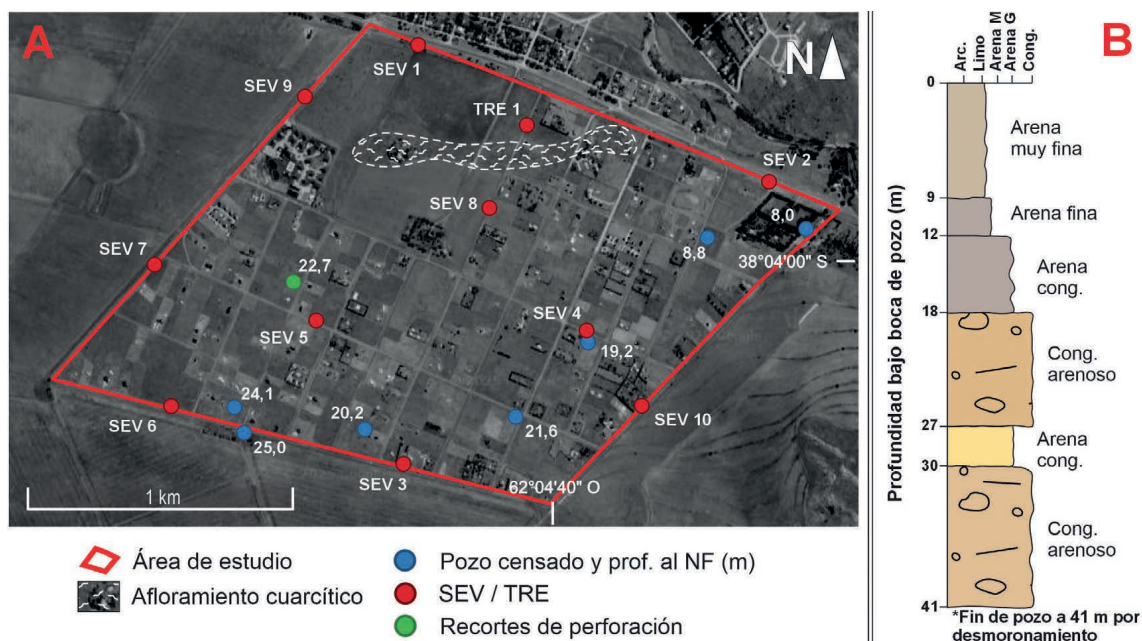


Figura 5. A) Mapa de ubicación de los pozos censados, recortes de perforación y estudios geoelectricos del área de estudio. B) Columna litológica confeccionada a partir de los recortes.

Para la interpretación de los datos, estas metodologías se parametrizaron de acuerdo con la geología e hidrogeología del área, considerando trabajos previos en la región, las mediciones del nivel freático obtenidas en el censo de pozos y los recortes de perforación del pozo censado ubicado a 170 m del SEV5 (Figura 5). Dadas las anisotropías geológicas locales, la heterogeneidad sedimentaria, las características geomorfológicas del área y las profundidades del nivel freático registradas, cada SEV fue interpretado de manera individual.

Una vez determinados los espesores acuíferos de interés, se procedió al cálculo de volumen de reservas hídricas subterráneas. Debido a la gran heterogeneidad vertical y espacial del medio, a partir de los datos geoelectricos y de las mediciones de la profundidad del nivel freático, se generaron con el software QGIS dos capas ráster: una correspondiente al basamento hidrogeológico y otra a la superficie freática, para así calcular por diferencia entre los mismos, el volumen de roca contenido entre ambos mediante el uso de la Calculadora Ráster del software mencionado.

Finalmente, dicho volumen fue multiplicado por la porosidad efectiva de los sedimentos, obteniéndose el volumen de agua subterránea almacenado en el área de estudio. Ante la inexistencia de datos de ensayos de bombeo en el área de estudio, que permitan estimar un valor de coeficiente de almacenamiento, se optó por utilizar un valor promedio de porosidad eficaz de estos materiales (equivalente al coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre) de 20%, mediante datos tabulados (Woessner y Poeter, 2020).

RESULTADOS

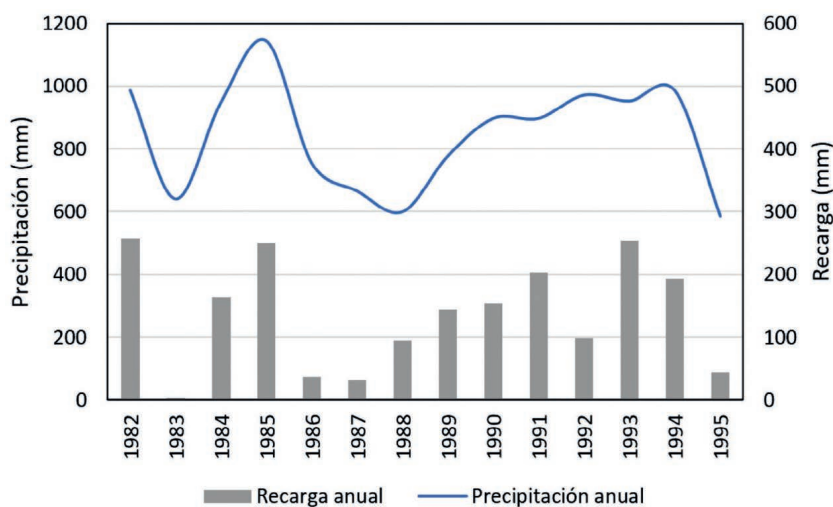
Estimación de la recarga y recurso hídrico subterráneo

Los excesos hídricos fueron calculados mediante la aplicación de un balance de agua en el suelo (BAS) de paso diario, utilizando el Software BALS-HORT V3 (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de recarga calculados con el balance de agua en el suelo (BAS) (1982-1995). En negrita se destacan los valores promedio, máximo y mínimo.

Año	Precipitación anual (mm)	ETR Anual (mm)	Recarga anual (mm)	Recarga (% de la P anual)
1982	987	702,8	257,4	26,1
1983	641	605,4	3,3	0,5
1984	949	831,6	163,1	17,2
1985	1145	873,7	249,9	21,8
1986	755	747,2	36,2	4,8
1987	666	624,3	31,3	4,7
1988	600	518	94,8	15,8
1989	778	585,1	142,8	18,4
1990	898	753,2	153,5	17,1
1991	898	729	202,9	22,6
1992	972	833,1	98,3	10,1
1993	953	738	253,5	26,6
1994	986	743,7	193,5	19,6
1995	586	590,2	43,3	7,4
Promedio	843,9	705,4	137,4	15,2

De acuerdo a este balance, se obtuvo una recarga promedio anual de 137,4 mm (15,2% de la precipitación anual), utilizando la serie de lluvias diarias disponibles para la Estancia Los Recovecos (1982-1995), cercana a la localidad de Sierra de la Ventana. Si bien la serie cuenta ya con cierta antigüedad, se trata de los únicos datos de frecuencia diaria disponibles para el sector. La variación interanual de la recarga estimada (Figura 6) permite identificar variabilidad de la misma en relación con la precipitación registrada.



■ **Figura 6.** Cuadro comparativo entre precipitación y recarga para la serie considerada.

Considerando la superficie del área de estudio de 2,93 km² y multiplicándola por la recarga media anual calculada, se obtuvo un recurso hídrico potencial (RHP) de 0,40 hm³/año.

Prospección geoelectrica y estimación de reservas hídricas subterráneas.— Para llevar a cabo la estimación del volumen de reservas hídricas subterráneas (RHS) en el área de estudio, se determinaron los espesores saturados de interés mediante el análisis integrado de la geoelectrica realizada. En los SEV (Fig. 7) se identificaron 3 electrocapas principales (Tabla 4) con continuidad en toda el área, así como una cuarta unidad con una distribución más restringida, evidenciando variaciones laterales significativas en el espesor de los depósitos sedimentarios, junto con cambios abruptos en la profundidad del basamento cuarcítico.

La electrocapa 1 está compuesta por los materiales sedimentarios que forman la zona no saturada (ZNS), generalmente dominada por limos y limos arenosos, con resistividades que oscilan entre 28 y 655 Ω.m. La electrocapa 2, caracterizada por resistividades que varían de 8 a 90 Ω.m, fue interpretada como sedimentos saturados con agua dulce de granulometría variable (principalmente limos arenosos, arenas y conglomerados cuarcíticos), los cuales constituyen la principal unidad acuífera del valle. La electrocapa 3 mostró resistividades de 117 a 4.940 Ω.m y corresponde al basamento hidrogeológico de la zona, compuesto por rocas cuarcíticas con valores de resistividad altos, típicos de roca masiva. En ocasiones, se reconoció un intervalo superior con resistividades intermedias dentro de esta electrocapa, interpretado como cuarcita fracturada, potencialmente capaz de almacenar agua dulce. Sobre este marco general, varios SEV revelan la presencia de la electrocapa 2', una unidad de baja resistividad (2-8 Ω.m) asociada a sedimentos de grano fino (limos y arcillas) de comportamiento acuicludo, generalmente interdigitada dentro de los depósitos acuíferos que

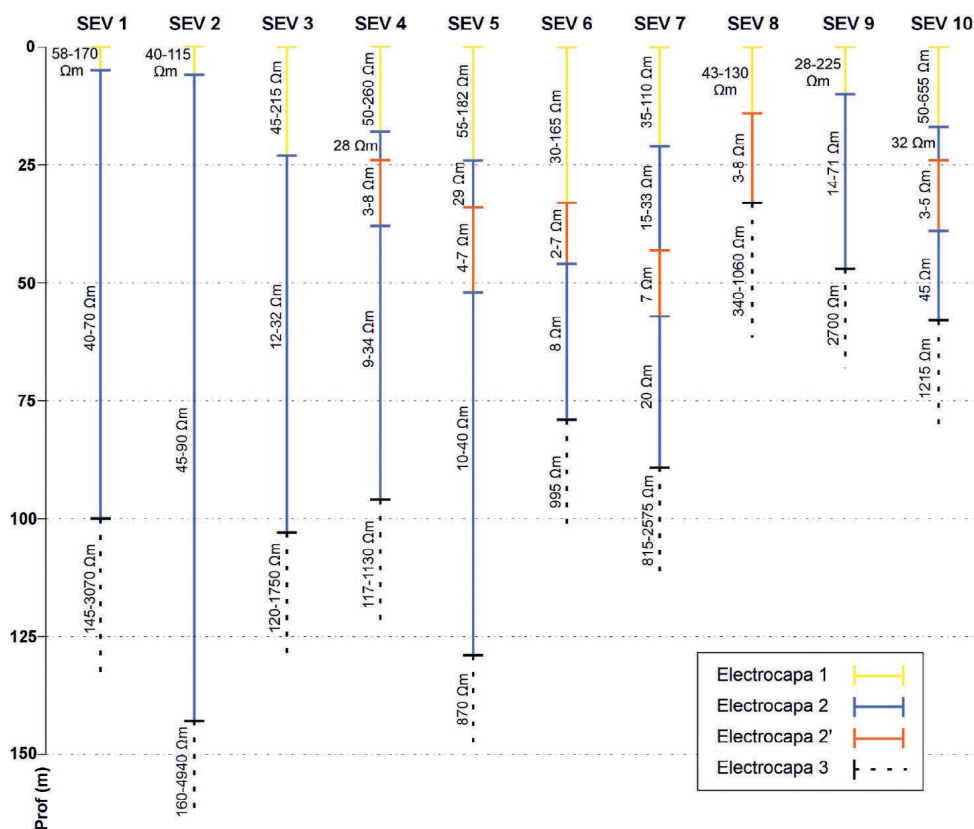


Figura 7. Electrocapas identificadas en los SEV realizados.

Tabla 4. Rangos de resistividad y espesores de las electrocapas identificadas en los sondeos eléctricos verticales (SEV).

Electrocapa	Resistividad (Ω.m)	Espesor (m)
1	28-655	5-33
2	8-90	24-137
2'	2-8	14-19
3	117-4940	-

componen la electrocapa 2. Su ocurrencia es discontinua y coincide con la distribución local documentada en los recortes de perforación, denotando una extensión areal limitada.

Por otro lado, la TRE (Figura 8) complementa la información puntual proporcionada por los SEV al permitir la visualización de las variaciones laterales en la resistividad. El perfil, adquirido a lo largo de un trazado NE-SO entre la Ruta 76 y los afloramientos de cuarcita en el sector elevado, muestra resistividades que oscilan entre 30 y 450 Ω.m.

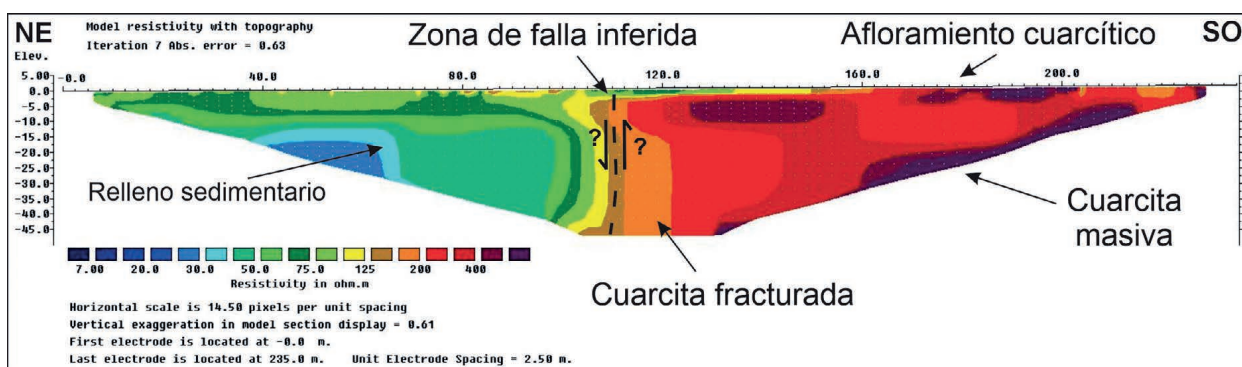


Figura 8. Imagen resultante de la TRE, con una zona de falla inferida a partir del contacto abrupto entre el relleno sedimentario y el basamento hidrogeológico.

Los valores de resistividad más bajos (porción NE del perfil) están asociados con depósitos conglomerádicos, arenosos y limoso-arenosos, mientras que el cambio de la resistividad hacia el SO alcanza los valores característicos de las rocas del basamento. La distribución de la resistividad revela un contacto abrupto entre el basamento cuarcítico y los depósitos de piedemonte sedimentarios, lo que indicaría la presencia de una zona de falla consistente con las descripciones geológicas regionales para el área (Dimieri *et al.*, 2005; Stach *et al.*, 2024)

De esta manera, considerando tanto la interpretación de los datos geoelectrónicos como las mediciones directas, el espesor acuífero de interés promedia los 68 m, con un máximo que ronda los 135 m. Interdigitado dentro del mismo, y en parte del área de estudio (sector centro/centro sur), se observa un nivel arcilloso, con un espesor promedio de 15,5 m. Debido a la incertidumbre respecto a la extensión de las fracturas del basamento, relleno y grado de interconexión de las mismas, los tramos superiores de las cuarcitas no fueron consideradas como volumen de material acuífero.

Considerando la heterogeneidad del medio, un cálculo general de reservas hídricas subterráneas utilizando los espesores promedio, resultaría en una incertidumbre sustancial en su estimación. Teniendo esto en cuenta, con la interpolación mediante Kriging de los puntos de medición de nivel freático y las interpretaciones del mismo a partir de datos de resistividad, se realizó en el software QGis una capa ráster correspondiente a la superficie freática en el área de estudio (Capa A). De la misma manera, utilizando los datos interpretados como el basamento hidrogeológico y los afloramientos del área, se generó una capa ráster representando la superficie del basamento del acuífero (Capa B). Por diferencia entre ambas (mediante el empleo de la Calculadora Raster), se determinó el volumen saturado comprendido entre el basamento y la superficie freática cifrado en 161,65 hm³. Sin embargo, el nivel arcilloso interdigitado observado en la columna sedimentaria (de características acuitardas e identificado como la electrocapa 2' en la geoelectrónica) no debe ser considerado en el volumen acuífero, por lo que fue restado del mismo. La superficie y espesor de este nivel se estimaron

según los datos geofísicos obtenidos, resultando en un volumen de 14,12 hm³. De esta manera, el volumen acuífero total (que representa la suma de material sedimentario junto a los poros saturados con agua) se estimó en 147,53 hm³.

Teniendo en cuenta las características del sector, dicho volumen se multiplicó por la porosidad eficaz media del material predominante, que se compone de conglomerados cuarcíticos matriz sostén (areno-limosa) y arenas finas a limosas. Conforme a ello, las reservas totales de agua subterránea disponibles en el sector se estimaron en 29,50 hm³.

DISCUSIÓN

La estimación de la recarga, el recurso y las reservas hídricas subterráneas son factores claves para la gestión sustentable y sostenible de los acuíferos (Aureli *et al.*, 2008; Min *et al.*, 2015; van der Gun, 2021). La cuantificación de estos parámetros, resulta de suma importancia para los gestores y actores políticos y el ordenamiento territorial de la población. Sin embargo, en varias regiones del mundo los recursos subterráneos se encuentran subutilizados debido a que no se ha invertido en su estudio y desarrollo (Mukherjee *et al.*, 2024).

Debido a la variabilidad natural de las precipitaciones y la evapotranspiración, los cambios en la humedad del suelo, las diferencias edafo-litológicas del mismo y la compleja interacción entre todos estos factores, la recarga es un fenómeno que fluctúa notablemente en el tiempo y el espacio. Sin embargo, el balance de agua en el suelo ha probado ser un método robusto y eficaz para la estimación de la misma. Es importante señalar que, si bien la serie de precipitaciones empleada corresponde a registros relativamente antiguos, se trata de la única fuente disponible con datos diarios continuos para el área de estudio. Aun así, el uso de datos diarios aporta una ventaja significativa: los balances de esta frecuencia suelen representar con mayor fidelidad la dinámica real de infiltración, evapotranspiración y almacenamiento del suelo, en comparación con los balances de paso mensual, ya que la recarga es un proceso que se presenta principalmente a escala temporal de eventos que no se ven reflejados en los registros mensuales (Wittenberg *et al.*, 2019; Patiño-Rojas y Jaramillo, 2022). Por lo tanto, aunque la antigüedad de la serie introduce cierta incertidumbre, la elección de un registro diario sigue siendo metodológicamente sólida, permitiendo obtener resultados representativos del comportamiento hidrológico del sistema.

En el área de Sierra de la Ventana, la Fundación de la Universidad Nacional del Sur (FUNS, 2017), realizó un balance de agua en el suelo de paso diario para el período 2004-2015 y cuantificó la recarga en 169 mm, es decir, un 17,6% de la precipitación. Este valor es similar a los obtenidos por autores anteriores para el sector serrano, de 15,8% (Albouy y Bonorino, 1997) y 18,3% (Carrica, 1998) de las precipitaciones.

Por otro lado, mediante el método de balance de masas del ión cloruro entre el agua de lluvia y el agua en la capa freática, Carrica (1998) la estimó en un 12,8% de la misma. Más recientemente, FUNS (2017) obtuvo un valor de recarga de 196 mm anuales (24% de la precipitación) con este método. Diversos autores han citado valores comparables en valles intermontanos y sectores de piedemonte similares (Blarasin *et al.*, 2016; Ketchum *et al.*, 2016; Uppasit, 2004; Afridi *et al.*, 2025).

En cuanto al recurso hídrico potencial calculado, este volumen de agua anual representa la cantidad que ingresa al sistema y mantiene el equilibrio natural del acuífero, balanceándolo con las descargas naturales (evaporación directa y descarga subterránea). A fines de asegurar la preservación de dicho equilibrio y obtener una explotación racional y sustentable a lo largo del tiempo, Ponce (2007) sugiere que los porcentajes medios explotados deberían ser del orden del 10 al 70% del recurso hídrico potencial. Estudios recientes subrayan que la preservación del recurso, debido a la variabilidad anual de la recarga, exige reservas de seguridad y márgenes precautorios sobre la extracción anual, para poder afrontar cambios climáticos y eventos extremos (Tapia-Villaseñor *et al.*, 2022; Mukherjee *et al.*, 2024).

Por último, la estimación de las reservas hídricas subterráneas en valles intermontanos y ambientes pedemontanos, presenta desafíos particulares debido a la complejidad estructural presente en estos sectores, generando importantes variaciones y heterogeneidades, tanto laterales como en profundidad, de los materiales acuíferos. Esto pone de manifiesto la necesidad de una mayor densidad de mediciones geofísicas para reducir la incertidumbre en los cálculos de volumen acuífero bajo estas condiciones. Se debe considerar que la estimación de reservas del acuífero presenta un nivel significativo de incertidumbre. Esto se debe principalmente a que la porosidad utilizada proviene de valores tabulados de la literatura, los cuales representan rangos generales para distintos tipos de sedimentos, pero no necesariamente reflejan, de manera precisa, las condiciones locales del medio. Dado que el volumen de agua almacenada es directamente proporcional a la porosidad asumida, variaciones en este parámetro pueden traducirse en diferencias sustanciales en el cálculo final de reservas. En este sentido, sería recomendable complementar los análisis con ensayos de bombeo, que permitan estimar coeficientes de almacenamiento aplicables al medio local estudiado. Finalmente, cabe aclarar que las reservas pueden ser utilizadas para cubrir la demanda de agua en aquellos años con escasa pluviometría, en donde la recarga es inferior a la media anual. Es decir, la reserva puede asociarse o sumarse al recurso solo ocasionalmente y para cubrir una demanda temporal y puntual.

CONCLUSIONES

La recarga del acuífero depende de los excesos hídricos producto de las precipitaciones en el sector. Los valores de recarga obtenidos mediante la aplicación de un balance de agua en el suelo de paso diario arrojaron promedio anual de 137,4 mm (15,2% de la precipitación media anual). De esta manera, el recurso hídrico subterráneo potencial para el área de estudio, se estimó en 0,40 hm³/año.

El espesor acuífero de interés promedia los 68 m, con un máximo que ronda los 135 m. Interdigitado dentro del mismo, y en la mayor parte del área de estudio (sector centro/ centro sur), se observa un nivel arcilloso, con un espesor promedio de 15,5 m. Las reservas hídricas subterráneas estimadas para el sector se cifraron en 29,50 hm³. Las características estructurales del sector generan importantes variaciones y heterogeneidades, tanto laterales como en profundidad, de los materiales acuíferos.

Los resultados obtenidos en este trabajo constituyen una base para la gestión sostenible del acuífero, brindando información de gran interés a los tomadores de decisiones para la planificación y ordenamiento territorial de la localidad. Si bien los valores estimados poseen cierto grado de incertidumbre, son los primeros de su tipo para el sector y deberán ser ajustados conforme se obtenga nueva información de las propiedades hidrogeológicas a partir de estudios futuros.

BIBLIOGRAFÍA

- Afridi, M.Z., Santha, N., Taweelarp, S., Ploymaklam, N., Khebchareon, M., Qamar, M.S. and Saenton, S. 2025. Groundwater Recharge Assessment and Recharge Zonation of the Intermontane Groundwater Basin, Chiang Mai, Thailand, Using a Groundwater Flow Model and Stable Isotopes. *Sustainability* 17(12): 5560. <https://doi.org/10.3390/su17125560>
- Albouy, R. y Bonorino, A.G. 1997. Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52(1): 81-92.
- Arzadún, G., Tomezzoli, R.N., Cisternas, M.E., Cesaretti, N.N. y Fortunatti, N. 2014. Análisis diagenético y estructural en la Formación Tunas (Pozo PANG0001 – Pérmico de la Cuenca de Claromecó – Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires, Argentina). *9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, Actas, pp. 481–497. Mendoza.
- Aureli, A., Ganoulis, J. and Margat, J. 2008. Groundwater resources in the Mediterranean region: importance, uses and sharing. In: *IEMed Yearbook, Water in the Mediterranean*, 96-105.

- Blarasin, M.T., Bécher Quinodóz, F.N., Cabrera, A., Matteoda, E.M., Alincaastro, N. and Giuliano Albo, M.J. 2016. Weekly and Monthly Groundwater Recharge Estimation in A Rural Piedmont Environment using the Water Table Fluctuation Method. *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)* 2(5): 104-113.
- Campo de Ferreras, A., Capelli, A. y Diez, P. 2004. *El clima del Sudoeste Bonaerense*. Bahía Blanca: EdiUNS.
- Carrica, J. 1993. Balshort: Un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana. *XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, Actas, Tomo VI, pp. 243–248.
- Carrica, J. 1998. *Hidrogeología de la cuenca del A° Napostá Grande, Provincia de Buenos Aires*. Tesis Doctoral (inérita). Universidad Nacional del Sur.
- De Francesco, F.O. 1992a. Estratigrafía del cenozoico en el flanco occidental de las Sierras de Curamalal, Sierras Australes Bonaerenses. *III Jornadas Geológicas Bonaerenses*, Actas, pp. 3–12. La Plata.
- De Francesco, F.O. 1992b. Formación del Águila: depósitos pedemontanos en el sector occidental de Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires. *III Jornadas Geológicas Bonaerenses*, Actas, pp. 13–17. La Plata.
- Dimieri, L., Delpino, S. y Turienzo, M. 2005. Estructura de las Sierras Australes de Buenos Aires. Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Buenos Aires. *XVI Congreso Geológico Argentino*, Relatorio, pp. 101–117.
- FAO. 2008. *FAO Water. Databases: Cropwat Decision Support System*. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html (consultado el: 1 diciembre 2025).
- Forte Lay, J.A. y Burgos, J.J. 1983. Verificación de los métodos de estimación de la variación de almacenaje en los suelos pampeanos. En: J.J. Burgos (Ed.). *Taller argentino-estadounidense sobre sequías*, Actas, pp. 162–180. Mar del Plata.
- FUNS. 2017. *Estudio hidrogeológico para abastecimiento de agua. Proyecto de urbanización: Jardines del Pillahuinco – barrio de montaña (Villa Arcadia, pdo. de Coronel Suárez)*. Informe inédito.
- Hasan, M. and Shang, Y. 2022. Geophysical evaluation of geological model uncertainty for infrastructure design and groundwater assessments. *Engineering Geology* 299: 106560.
- González Uriarte, M. 2002. Geoambientes del Sudoeste Bonaerense. En: Vaquero, M. (comp.), *Territorio, economía y medio ambiente en el Sudoeste Bonaerense*. Bahía Blanca: EdiUNS.
- Harrington, H.J. 1947. Explicación de las Hojas Geológicas 33m y 34m, Sierras de Curamalal y de la Ventana, Provincia de Buenos Aires. *Boletín* 61, S.I.C. 44, 42 p. Buenos Aires: Dirección de Minas y Geología.

- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D. Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R.G., Fallatah, O. and Kirchner, J.W. 2024. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature* 625: 715–721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- Ketchum, D., Talon Newton, B. and Phillips, F. 2016. *High-resolution estimation of groundwater recharge for the Sandia/Manzano Mountains region (New Mexico)*. Reporte técnico NMWRRI.
- Kuang, X., Liu, J., Scanlon, B.R., Jiao, J.J., Jasechko, S., Lancia, M., Biskaborn, B.K., Wada, Y., Li, H., Zeng, Z., Guo, Z., Yao, Y., Gleeson, T., Nicot, J-P., Luo, X., Zou, Y. and Zheng, C. 2024. The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science* 383(6686): eadf0630.
- Kruse, E.E. 2015. Uso del agua subterránea y desarrollo sostenible. *NÚCLEOS Revista Científica* 30–37.
- Lizzi, J.M, Garbulsky, M.F, Golluscio, R.A. y Deregibus, A.V. 2007. Mapeo indirecto de la vegetación de Sierra de la Ventana, provincia de Buenos Aires. *Ecología austral* 17(2): 217-230.
- Loke, M.H. 2004. *Tutorial: 2D and 3D Electrical Imaging Surveys*. Geotomo Software. Disponible en: <http://www.geotomosoft.com/coursenote.zip> (consultado el: 1 diciembre 2025).
- Min, L., Shen, Y. and Pei, H. 2015. Estimating groundwater recharge using deep vadose zone data under typical irrigated cropland in the piedmont region of the North China Plain. *Journal of Hydrology* 527: 305-315.
- Mukherjee, A., Jha, M.K., Kim, K.W. and Pacheco, F. 2024. Groundwater resources: challenges and future opportunities. *Sci Rep* 14: 28540. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79936-5>
- Nigro, J. y Perdomo, S. 2017. Desarrollo de software de inversión de datos 1D para sondeos eléctricos verticales Schlumberger. *XXVIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG 2017) y Tercer Simposio IPSES*, La Plata, Argentina.
- Nouradine, H., Schamper, C., Valdes, D., Moussa, I., Ramel, D. and Plagnes, V. 2024. Integrating geological, hydrogeological and geophysical data to identify groundwater resources in granitic basement areas (Guéra Massif, Chad). *Hydrogeol J* 32: 759–784. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02766-2>
- Paoloni, J.D., Vázquez, R. y Fiorentino, E.C. 1988. La topografía y la variación de las precipitaciones y los escurrimientos en el sistema de Ventania. *Segundas Jornadas Geológicas Bonaerenses*, Actas, pp. 651–661. Bahía Blanca.
- Patiño-Rojas S.M. y Jaramillo, M. 2022. Estimación espaciotemporal de la recarga potencial en un sistema pseudokárstico tropical. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 46(178):261-278. <https://doi.org/10.18257/racefyn.1512>
- Ponce, V.M. 2007. *Rendimiento sostenible del agua subterránea*. Disponible en: <http://ponce.sdsu.edu/rendimiento.html> (consultado el: 1 diciembre 2025).

- Sala, J.M. 1975. Recursos hídricos de la provincia de Buenos Aires, especial mención de las aguas subterráneas. *VI Congreso Geológico Argentino*, Relatorio, pp. 169–193. Bahía Blanca.
- Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting* 40(4): 453–463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1992.tb00536.x>
- Scanlon, B.R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R.Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S.R., Konikow, L.F., Long, D., Mekonnen, M., Müller Schmied, H., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R.C., Shamsudduha, M., Simmons, C.T., Sun, A. Taylor, R.G., Villholth, K.G., Vörösmarty, C.J. and Zheng, C. 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment* 4(2): 87-101.
- Sendrós, A., Cabrera, M.D.C. and Casas-Ponsatí, A. 2025. Application of Geophysical Methods for Hydrogeology. *Water* 17(1): 98.
- Stach, C., Sánchez, N.P. y Turienzo, M. 2024. Análisis de la deformación de las Formaciones Napostá y Providencia en la zona de estancia Funke, sector sudoeste de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. *Acta Geológica Lilloana* 35(2), 203–242. <https://doi.org/10.30550/j.agl/2028>
- Tapia-Villaseñor, E.M., Shamir, E., Cruz-Ayala, M.B. and Megdal, S.B. 2022. Assessing Groundwater Withdrawal Sustainability in the Mexican Portion of the Transboundary Santa Cruz River Aquifer. *Water* 14(2): 233. <https://doi.org/10.3390/w14020233>
- UNESCO / WWAP. 2022. *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater – Making the Invisible Visible*. United Nations World Water Assessment Programme (WWAP), UNESCO, Paris.
- Uppasit, S. 2004. *Groundwater Recharge Calculation of Chiang Mai Basin Using Water-Table Fluctuation Method*. Tesis de Maestría. Universidad de Chiang Mai, Tailandia.
- van der Gun, J. 2021. Groundwater resources sustainability. *Global Groundwater* 331-345. Elsevier.
- Wittenberg, H., Aksoy, H. and Miegel, K. 2019. Fast response of groundwater to heavy rainfall. *Journal of Hydrology* 571: 837-842. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.037>
- Woessner, W.W. and Poeter, E.P. 2020. *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. The Groundwater Project. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-2-0>
- Zohdy, A.R. 1989. A new method for automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics* 54(2): 245–253.