

# Recarga difusa en el acuífero freático de la barrera medanosa costera del sudoeste bonaerense, Argentina: evaluación mediante métodos independientes

**Andrés Gabriel RUFFO<sup>\*1,2</sup>, Matías REY<sup>1,2</sup>, René ALBOUY<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> CONICET-CCT Bahía Blanca

<sup>2</sup> Departamento de Geología UNS

<sup>3</sup> Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA CIC).

\*Email: andres.ruffo@uns.edu.ar

**Editor:** Ricardo A. Astini

Recibido: 10/12/2025

Aceptado: 06/05/2026

## RESUMEN

La cuantificación del volumen de agua que ingresa al acuífero resulta fundamental para una gestión sustentable y sostenible del recurso, especialmente en zonas semiáridas como el sudoeste bonaerense. El área de estudio presenta, en su sector costero, una barrera medanosa que conforma un acuífero libre con agua dulce en un entorno árido-semiárido, principal fuente de abastecimiento para las poblaciones del sector. En este trabajo se cuantifica la recarga natural al acuífero, producto de los excesos hídricos de las precipitaciones, mediante dos metodologías independientes entre sí: el balance de agua en el suelo (BAS) a paso diario y el balance de masas del ion cloruro. La primera se aplicó utilizando dos series de precipitación diaria (2001–2018 y 2013–2024) y dos estimaciones de evapotranspiración potencial independientes entre sí. El método del ion cloruro se implementó a partir de 20 eventos de precipitación y de la concentración de cloruro en seis pozos ubicados en sectores de recarga preferencial de la cadena medanosa. El valor porcentual de recarga media anual obtenido para el área de estudio mediante las distintas metodologías se situó entre el 27 % y el 39 % de la precipitación media anual, con máximos del 61 % y mínimos del 18 %, evidenciando su variabilidad temporal. Estos valores resultan compatibles con las estimaciones de recarga calculadas por otros autores para la zona de estudio y para regiones similares.

**Palabras clave:** Balance de masas, agua subterránea, ion cloruro.

## ABSTRACT

*Diffuse recharge in the phreatic aquifer of the coastal dune barrier of southwestern Buenos Aires, Argentina: evaluation using independent methods.* Quantifying the volume of water entering the aquifer is essential for the sustainable management of the resource, particularly in semiarid regions such as the southwestern sector of Buenos Aires Province. The study area features a sandy barrier of dunes that hosts an unconfined freshwater aquifer within an arid-semiarid environment, which constitutes the main water supply for local populations. This study quantifies natural aquifer recharge resulting from precipitation-driven water surplus using two independent methods: a daily-step Soil Water Balance (SWB) and the chloride mass balance approach. The former was applied using two daily precipitation series (2001–2018 and 2013–2024) and two independent estimates of potential evapotranspiration. The chloride mass balance method was implemented based on 20 precipitation events and chloride concentrations measured in six wells located in preferential recharge zones of the dune system. The annual mean recharge rate estimated for the study area using both metho-

dologies ranged between 27 % and 39 % of mean annual precipitation, with maximum values of 61 % and minimum values of 18 %, highlighting its temporal variability. These results are consistent with recharge estimates reported by other authors for the study area and for similar regions.

**Keywords:** Mass balance, Groundwater, Chloride.

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial genera una presión cada vez más desafiante sobre los recursos naturales, particularmente sobre el agua dulce disponible. Este incremento se da acompañado de una ocupación territorial desigual, concentrándose una proporción significativa de la población en áreas costeras, donde los recursos hídricos suelen ser limitados y vulnerables (UN-DESA 2013, Barragán y De Andrés 2016). En estos ambientes, los acuíferos libres representan, en muchos casos, la principal fuente de abastecimiento, por lo que su conocimiento y adecuada gestión resultan fundamentales (Taylor et al. 2013, Gleeson et al. 2020).

En regiones áridas y semiáridas, la recarga natural de los acuíferos constituye un proceso clave dentro del ciclo hidrológico, aunque su cuantificación presenta importantes dificultades debido a la complejidad de los factores que la controlan. Entre ellos se destacan la variabilidad climática, la distribución temporal de las precipitaciones, las características del suelo y la variabilidad geológica de la zona no saturada, así como la cobertura vegetal y el uso del suelo (Scanlon et al. 2002, Healy 2010, Crosbie et al. 2013, Li et al. 2024). En este sentido, numerosos estudios desarrollados en diferentes regiones del mundo han puesto de manifiesto la alta variabilidad espacial y temporal de la recarga, incluso dentro de sistemas hidrogeológicos relativamente homogéneos, como es el caso de acuíferos arenosos en ambientes semiáridos de Australia, África del Norte y la cuenca mediterránea (Crosbie et al. 2013, Jiries et al. 2025, Merouchi et al. 2025).

Particularmente, en ambientes costeros dominados por depósitos eólicos arenosos, como las barreras medanosas, la elevada permeabilidad de los sedimentos favorece la infiltración del agua de lluvia y el desarrollo de procesos de recarga difusa, mientras que la escorrentía superficial resulta prácticamente inexistente. Estas características han sido documentadas en diversos sistemas costeros a nivel internacional, donde se registran tasas de recarga relativamente elevadas en comparación con otros ambientes circundantes, aunque sujetas a una marcada variabilidad interanual (Crosbie et al. 2013, Sánchez Caro et al. 2023). No obstante, esta misma condición de alta permeabilidad también implica una mayor vulnerabilidad frente a cambios en el uso del suelo, la

expansión urbana y las variaciones climáticas, lo que refuerza la necesidad de contar con estimaciones confiables de la recarga (Carretero et al. 2022, Gleeson et al. 2020).

En este contexto, la estimación del ingreso de agua a los acuíferos presenta dificultades inherentes asociadas a la escala de análisis y a la disponibilidad de datos. La utilización de mediciones puntuales que luego deben extrapolarse a escalas regionales introduce incertidumbres que pueden ser significativas (Custodio et al. 2000, Healy 2010). Por este motivo, la aplicación de diferentes metodologías de estimación, preferentemente independientes entre sí, constituye una estrategia ampliamente recomendada, ya que permite contrastar resultados y acotar los rangos de incertidumbre asociados (Healy y Cook 2002, Scanlon et al. 2002, Carrica et al. 2018).

En la costa de la provincia de Buenos Aires, los acuíferos desarrollados en barreras medanosas representan sistemas hidrogeológicos de gran importancia, dado que constituyen la principal fuente de abastecimiento para numerosas localidades turísticas y presentan un equilibrio hidrodinámico particularmente sensible (Auge 2004, Gonzalez 2005, Isla et al. 2024). Estudios previos en la región han estimado valores de recarga relativamente elevados, asociados a la alta infiltración y a la escasa escorrentía superficial característica de estos ambientes (Carrica et al. 2012, Sánchez Caro et al. 2023). Sin embargo, la cuantificación de la recarga y su variabilidad temporal continúa siendo un aspecto poco desarrollado en el sudoeste bonaerense, donde la información disponible es aún limitada.

El presente trabajo tiene como objetivo cuantificar la recarga difusa del acuífero freático en la barrera medanosa costera del sudoeste de la provincia de Buenos Aires mediante la aplicación de dos metodologías independientes: el balance de agua en el suelo a paso diario y el balance de masas del ion cloruro, con el fin de aportar herramientas que contribuyan a una mejor gestión del recurso hídrico en la región.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>, se ubica en el sector costero del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, sobre una barrera medanosa de orientación

general este-oeste. Se extiende entre las ciudades de Punta Alta (partido de Coronel de Marina Leonardo Rosales) y Monte Hermoso, incluyendo la localidad de Pehuén-Có. Presenta un frente marítimo de aproximadamente 70 km de longitud, mientras que hacia el norte limita con la llanura pampeana, caracterizada por el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas (Figura 1).

La barrera de dunas constituye el rasgo geomorfológico dominante del área, con un ancho promedio de 5 km que alcanza hasta 8 km en algunos sectores. Se reconocen sucesivas crestas dunares desde el frente costero hacia el continente, con una pendiente general hacia el sur (Marcomini y López 2006). Las dunas presentan morfologías variables, incluyendo formas transversales, barjanoides y parabólicas, y se encuentran mayormente estabilizadas por la vegetación, aunque persisten pequeños y escasos sectores activos en proximidades de la costa (Marcomini et al. 2005). Las cotas topográficas máximas se registran en el sector norte, alcanzando valores cercanos a 40 m.s.n.m., mientras que hacia el sector costero las alturas disminuyen significativamente.

Las características litológicas y texturales de los sedimentos, dominados por arenas finas a medianas, determinan una elevada permeabilidad, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia y limita el desarrollo de escorrentía superficial, la cual es prácticamente inexistente o de carácter efímero en eventos excepcionales (Ruffo 2022).

En cuanto al uso del suelo, la barrera medanosa presenta un grado muy bajo de intervención antrópica en comparación con las áreas adyacentes de la llanura pampeana. Una proporción significativa del área de estudio corresponde a terrenos pertenecientes a la Base Naval Baterías (Armada Argentina), los cuales son de acceso restringido y se man-

tienen sin intervenciones antrópicas relevantes, conservando condiciones naturales con predominio de pastizales nativos. En el resto del sector, las actividades productivas se limitan a una ganadería extensiva de muy baja intensidad, que no implica modificaciones sustanciales en las propiedades físicas del suelo, en su cobertura, ni en los procesos hidrológicos asociados.

El único núcleo urbano relevante dentro del área es la localidad de Pehuén-Có, que presenta un desarrollo urbano limitado, con baja densidad de ocupación y escasa infraestructura (por ejemplo, ausencia de pavimentación). En este contexto, el sistema puede considerarse representativo de condiciones cercanas al estado natural.

El clima de la región es semiárido a subhúmedo con marcada variabilidad estacional. La precipitación media anual (PMA) es del orden de 732 mm (serie 1982–2017, Ea. El Palomar), con máximos concentrados en otoño y primavera, mientras que el invierno constituye el período más seco. El verano presenta condiciones semisecas a secas, con elevados valores de evapotranspiración (Ruffo, 2022). Las temperaturas medias anuales oscilan entre 14 °C y 20 °C, registrándose máximos superiores a 40 °C en verano y temperaturas bajo 0 °C durante el invierno.

## Geología e hidrogeología

Los depósitos que conforman el subsuelo del área son el resultado de la evolución geológica cuaternaria, vinculada a fluctuaciones del nivel del mar que dieron lugar a la alternancia de sedimentos de origen marino y continental (Aramayo et al. 2002). En términos generales, la secuencia estratigráfica está constituida por depósitos loésicos correspondientes a los Sedimentos Pampeanos y la Formación Monte Hermoso



Figura 1. Área de estudio.

en la base, sobre los cuales se disponen depósitos psamfíticos de origen fluvial, marino y eólico, de extensión lateral variable. La cubierta superficial está conformada por arenas eólicas que constituyen la actual barrera medanosa.

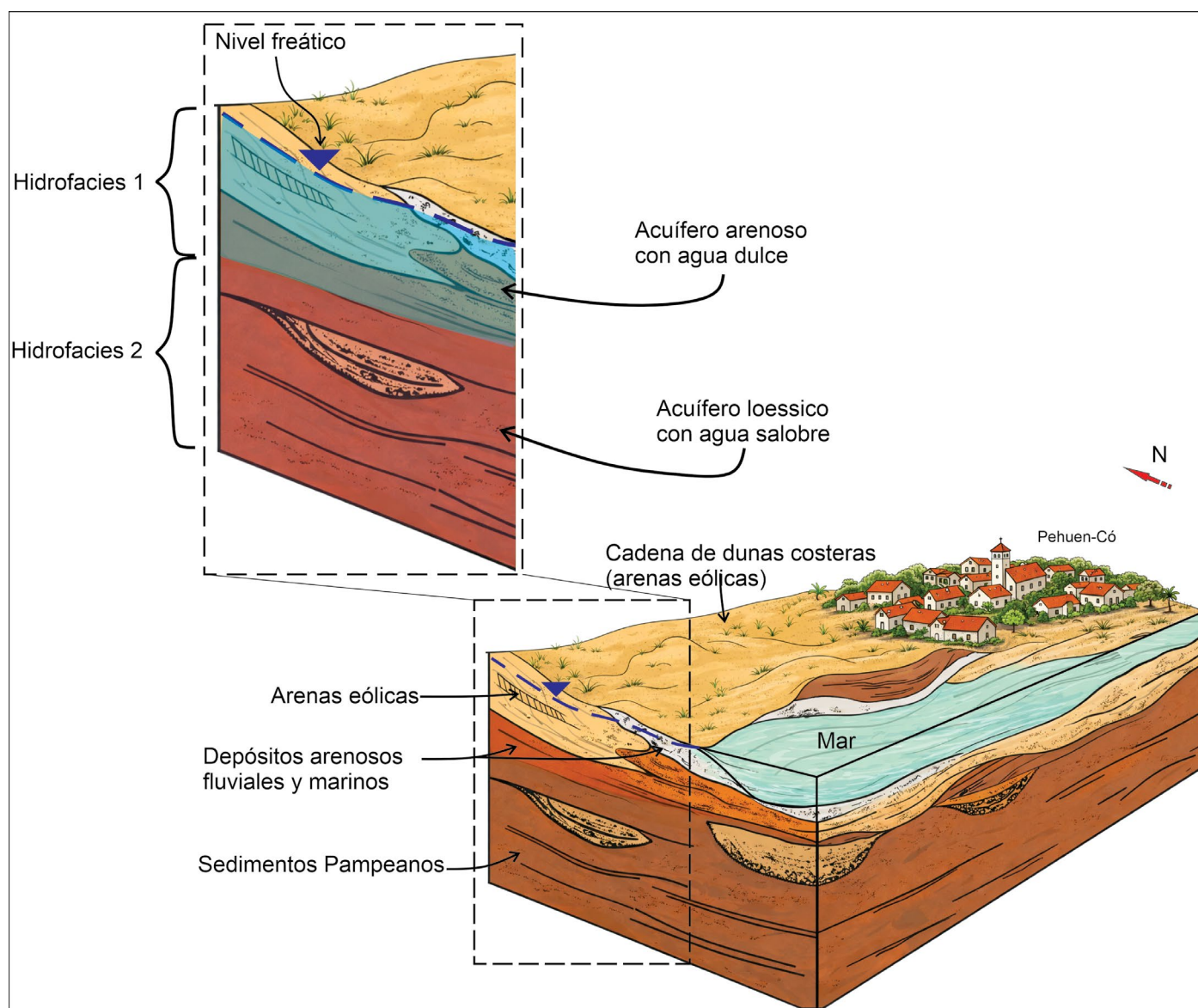
Estas características litológicas condicionan el funcionamiento hidrogeológico del sistema. En este sentido, se reconocen dos sistemas acuíferos principales, diferenciados en función de sus propiedades hidráulicas e hidroquímicas.

El sistema superior corresponde al acuífero freático desarrollado en los depósitos arenosos que conforman la barrera medanosa (Hidrofacies 1), el cual presenta un comportamiento libre, con niveles freáticos someros, generalmente a menos de 5 m de profundidad. Este acuífero posee un espesor variable entre 20 y 50 m, elevada permeabilidad, transmisividades del orden de 210 m<sup>2</sup>/día y coeficientes de almacenamiento

cercanos a 0.20, alojando aguas de baja salinidad, con conductividades eléctricas generalmente inferiores a 800 µS/cm (Ruffo, 2022).

Subyacente a este se desarrolla un sistema de menor permeabilidad, asociado a los sedimentos loésicos de la Formación Monte Hermoso y los Sedimentos Pampeanos (Hidrofacies 2). Este nivel actúa como acuífero de baja productividad, caracterizado por aguas de mayor salinidad (conductividades superiores a 1800 µS/cm) y menores coeficientes de almacenamiento. Ambos sistemas se encuentran hidráulicamente conectados y presentan comportamientos distintos, relacionados a su composición litológica (Figura 2).

La dinámica del acuífero freático está fuertemente controlada por la topografía, presentando una superficie freática que reproduce, en términos generales, la morfología del terre-



**Figura 2.** Modelo geológico/hidrogeológico conceptual esquemático del sistema costero (Sin escala).

no. El flujo subterráneo regional se orienta predominantemente en sentido norte-sur, con descarga hacia el frente litoral marítimo. En el sector comprendido entre Pehuén-Có y Monte Hermoso se identifica una divisoria de aguas subterráneas de orientación oeste-este, a partir de la cual los flujos divergen hacia el norte y hacia el sur (Ruffo et al. 2025) (Figura 3). En función de las características geomorfológicas e hidrodinámicas del sistema, la totalidad de la barrera medanosa actúa como área de recarga.

## METODOLOGÍA

Para la estimación de la recarga al acuífero freático se aplicaron dos metodologías independientes: el balance de agua en el suelo a paso diario (BAS) y el balance de masas del ion cloruro (Cl<sup>-</sup>).

### Balance de agua en el suelo (BAS)

El balance de agua en el suelo (BAS) se basa en la aplicación del principio de conservación de la masa en un volumen de control representado por el suelo, considerando las entradas, salidas y almacenamiento de agua en un intervalo de tiempo determinado. Para su cálculo se utilizó el software Balshort V.3 (modificado de Carrica 1993, Carrica 2009), el cual permite estimar la evapotranspiración real (ETR) y los excesos hídricos diarios, estos últimos asimilables a la recarga al acuífero.

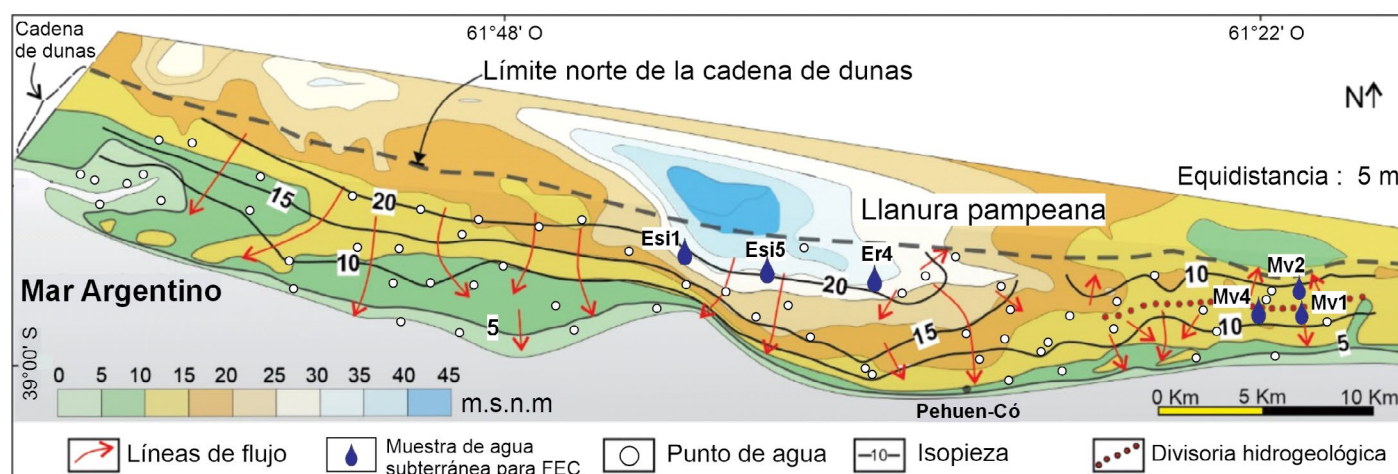
Como datos de entrada se utilizaron registros de precipitación diaria, evapotranspiración potencial (ETP), parámetros del suelo y características de la cobertura vegetal. La ETP mensual fue distribuida en valores diarios constantes, según la simplificación propuesta por Forte Lay y Burgos (1983),

considerando que el valor diario resulta de dividir la ETP mensual por el número de días de cada mes.

Se emplearon dos series de precipitaciones diarias ininterrumpidas. La primera corresponde a un registro de 18 años (2001–2018) del partido de Coronel Rosales (sector próximo a la Base Naval Baterías), suministrado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La segunda corresponde a una serie de 11 años (2013–2024) del balneario Pehuén-Có, obtenida a partir de mediciones locales. La consistencia entre ambas series fue evaluada mediante un análisis de doble masa, obteniéndose un ajuste lineal con coeficiente de determinación  $R^2 = 0,999$ .

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de los resultados frente a la estimación de la ETP, se consideraron dos fuentes de datos (Tabla 1). La primera corresponde a valores obtenidos mediante el método de Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani 1985), calibrado regionalmente por Almorox et al. (2012) (HG mod), quienes ajustaron los coeficientes empíricos para mejorar su correlación con el método de Penman–Monteith (FAO 1998). A partir de esta calibración, Ruffo (2022) estimó una ETP media anual de 1089 mm para el área de estudio. La segunda fuente de ETP corresponde a mediciones de evaporación en tanque tipo “A”, registradas en la localidad de Argerich durante el período 1946–1965 (Edison Consult 1967), a partir de las cuales se obtuvo un valor medio anual de 908 mm.

El suelo fue caracterizado como de textura arenosa, con una capacidad de retención de agua de 24 mm, considerando una profundidad radicular de 30 cm y una retención específica del 8%, valores representativos de este tipo de materiales (Geological Survey Water-Supply Paper 1839-D 1967, Sánchez et al. 1998). La cobertura vegetal fue considerada como pastizal, con una capacidad de intercepción de 5 mm.



**Figura 3.** Relación entre la topografía y el comportamiento hidrodinámico del acuífero. (Modificado de Ruffo et al. 2025).

**Cuadro 1.** Comparación entre las dimensiones de las fibras naturales y la estimación de reducción tamaño si fueran afectadas por dispersión en el aire y/o disgregación en medio aéreo

| ETP (mm) |        |        | ETP (mm)   |        |        |
|----------|--------|--------|------------|--------|--------|
| Mes      | HG mod | Tanque | Mes        | HG mod | Tanque |
| Enero    | 168.8  | 161    | Julio      | 31.3   | 19     |
| Febrero  | 127.7  | 119    | Agosto     | 46.8   | 31     |
| Marzo    | 104.4  | 86     | Septiembre | 69.4   | 50     |
| Abril    | 64     | 51     | Octubre    | 105.2  | 77     |
| Mayo     | 40.5   | 25     | Noviembre  | 135.8  | 124    |
| Junio    | 28.1   | 16     | Diciembre  | 167.1  | 149    |
| Total    |        |        | Total      |        |        |
|          |        |        | 1089       |        |        |
|          |        |        | 908        |        |        |

Dado que el área de estudio presenta condiciones relativamente homogéneas en cuanto a litología, cobertura vegetal y uso del suelo, el análisis se realizó a escala regional, utilizando parámetros representativos del sistema en su conjunto.

### Balance de masas del ion cloruro

El método de balance de masas del ion cloruro se basa en la relación entre la concentración de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) en el agua de lluvia y en el agua subterránea, considerando el carácter conservativo de este ion en sistemas hidrogeológicos sin aportes adicionales significativos.

La concentración de cloruro en el agua de recarga se ve incrementada respecto a la precipitación debido a los procesos de evapotranspiración, lo que permite definir un factor de enriquecimiento de cloruro (FEC), expresado como:

$$\text{FEC} = [\text{Cl}^-] / [\text{Cl}^-]_p \quad (1)$$

donde  $[\text{Cl}^-]$  es la concentración de cloruro en el agua de recarga y  $[\text{Cl}^-]_p$  es la concentración en el agua de lluvia.

En ambientes donde el escurrimiento superficial es despreciable, como en el área de estudio, la recarga (R) puede estimarse mediante:

$$R = P * 1/\text{FEC} \quad (2)$$

La precipitación media anual P (mm/año) utilizada, corresponde a una serie de 36 años de datos mensuales (1982–2017) obtenida en la estación Ea. El Palomar (Pehuén C6).

Las concentraciones de cloruro en el agua de lluvia fueron determinadas a partir de 20 eventos de precipitación registrados entre 2016 y 2018 en las localidades de Monte Hermoso y Pehuén C6.

El  $\text{Cl}^-$  en el agua subterránea fue determinado a partir de muestras correspondientes a seis captaciones someras (molinos/perforaciones) ubicadas en la zona medanosa (Figura 3). Estas captaciones presentan profundidades finales menores a 15 m y se encuentran entubadas con secciones ranuradas en toda su longitud, interceptando el acuífero freático desarrollado en los dep6sitos arenosos (Hidrofacies 1).

Las muestras de agua, tanto subterránea como de lluvia, fueron analizadas en los laboratorios LANAQUI y LIUC (Bahía Blanca), dependientes del CONICET y la Universidad Nacional del Sur. El ion cloruro fue determinado siguiendo las metodologías estándar recomendadas en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA y WPCF, 1992).

## RESULTADOS

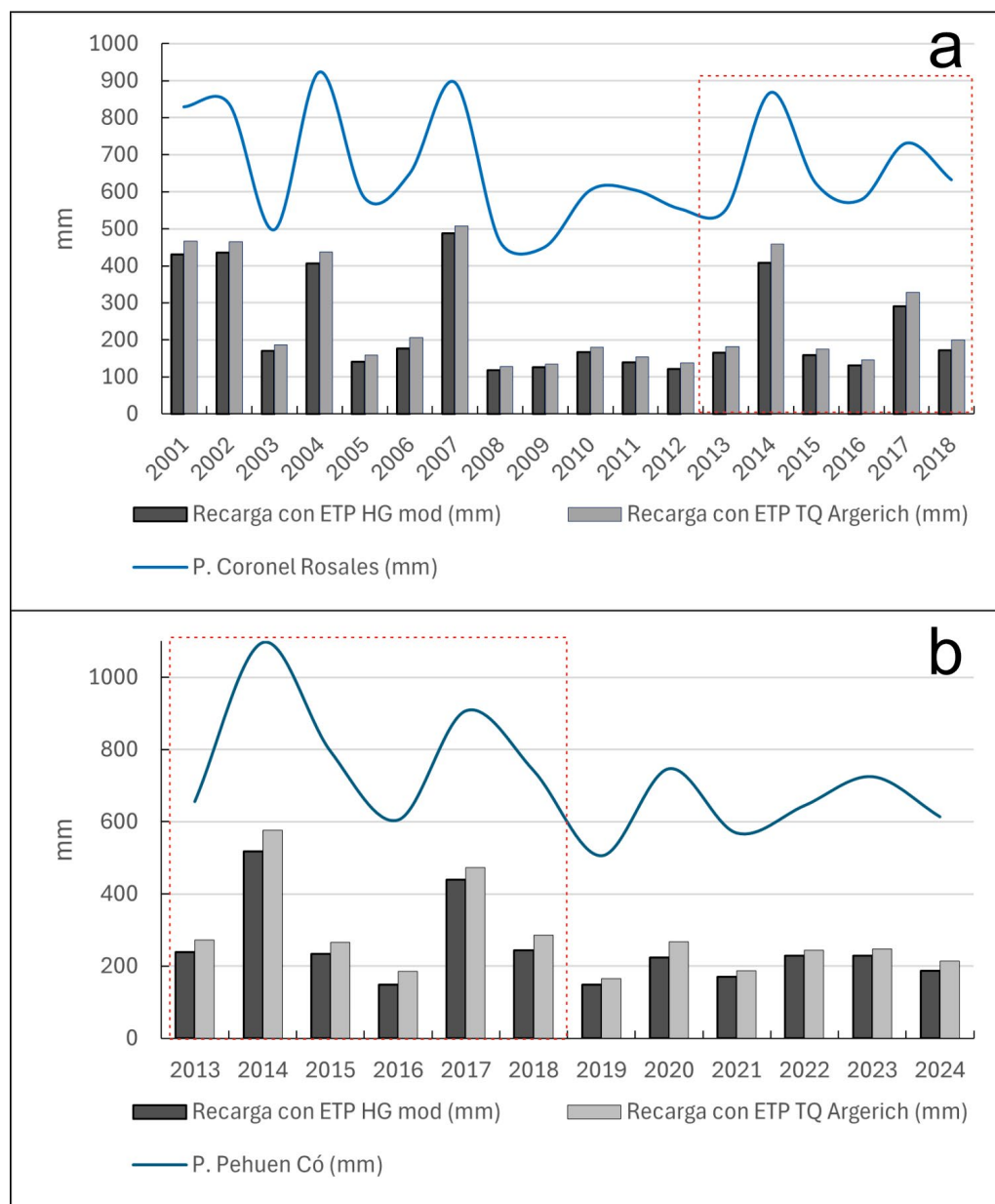
### Balance de agua en el suelo (BAS)

Los resultados obtenidos mediante el balance de agua en el suelo (BAS) muestran una variabilidad interanual en los valores de recarga estimada, asociada a las fluctuaciones en la precipitación a lo largo de los períodos analizados (Figura 4).

Para la serie correspondiente al partido de Coronel Rosales (2001–2018), la recarga media anual estimada mediante el método de Hargreaves-Samani calibrado (HG mod) es de 236 mm/año (36 % de la PMA), mientras que utilizando la evapotranspiración derivada de tanque (ETP tanque) se obtiene un valor medio de 259 mm/año (39 % de la PMA). Los valores anuales presentan un rango comprendido entre 128 y 924 mm/año, evidenciando una marcada variabilidad interanual.

En la serie de Pehuén C6 (2013–2024), los resultados son comparables, con valores medios de recarga del orden de 266 mm/año o 37 % de la PMA (HG mod) y 282 mm/año equivalente al 39 % de la PMA (ETP tanque), y un rango de variación entre 165 y 1096 mm/año.

La comparación entre ambas estaciones indica una coherencia general en los valores estimados, tanto en términos de magnitud como de comportamiento temporal. En particular, los años con mayores precipitaciones presentan incrementos en la recarga, mientras que los períodos con menores aportes hídricos muestran valores reducidos (Tabla 2).



**Figura 4.** Serie temporal de precipitación y recarga anual (BAS) para estaciones. a- Precipitación de Coronel Rosales. b- Precipitación Pehuén C . El recuadro rojo indica los años en común de las series.

En términos relativos, la recarga representa un porcentaje significativo de la precipitación anual, manteniendo una relación consistente a lo largo de las series analizadas.

### Balance de masas del ion cloruro

El método de balance de masas del ion cloruro permitió estimar la recarga a partir de la relación entre las concentraciones de Cl<sup>-</sup> en la precipitación y en el agua subterránea.

El valor promedio de cloruro en la precipitación, determinado a partir de 20 eventos, es de 0.45 meq/L (Tabla 3), mientras que las concentraciones en el agua subterránea, correspondientes a las seis captaciones analizadas, presentan valores entre 1.04 y 2.42 meq/L (Tabla 4).

A partir del valor promedio de FEC anteriormente calculado y la precipitación media anual, es posible calcular la recarga de la siguiente manera:

$$R = 732 \text{ mm/año} \cdot 1/3.73 \text{ (3)}$$

$$R = 196 \text{ mm/año (4)}$$

De esta forma, el porcentaje de recarga calculada con el balance del ion cloruro resulta de 27 % como valor medio, con máximos de 61 % y mínimos de 18 %.

### Comparación de metodologías

La comparación entre las metodologías aplicadas evidencia una concordancia general en las estimaciones de recarga. El balance de masas del ion cloruro arroja un valor equivalen-

**Cuadro 2.** valores anuales de recarga para ambas series y ambos métodos de ETP.

| Serie                     | valor | Precipitación (PMA) | Hargreaves modificada |    | ETP tanque "tipo A" |    |
|---------------------------|-------|---------------------|-----------------------|----|---------------------|----|
|                           |       |                     | Recarga anual         |    | Recarga anual       |    |
|                           |       | mm                  | mm                    | %  | mm                  | %  |
| Cnel. Rosales (2001-2018) | Prom  | 660                 | 236                   | 36 | 259                 | 39 |
|                           | Máx   | 924                 | 488                   | 53 | 507                 | 55 |
|                           | Min   | 452                 | 118                   | 26 | 128                 | 28 |
| Pehuén Có (2013-2024)     | Prom  | 717                 | 266                   | 37 | 282                 | 39 |
|                           | Máx   | 1096                | 518                   | 47 | 577                 | 53 |
|                           | Min   | 506                 | 149                   | 29 | 165                 | 33 |

**Cuadro 3.** concentraciones de Cl<sup>-</sup> en el agua de lluvia.

| Nº Muestra | Cl <sup>-</sup> (mg/L) | Nº Muestra | Cl <sup>-</sup> (mg/L) |
|------------|------------------------|------------|------------------------|
| 1          | 6                      | 11         | 3                      |
| 2          | <1                     | 12         | 57                     |
| 3          | 4                      | 13         | 6                      |
| 4          | 45                     | 14         | <1                     |
| 5          | 77                     | 15         | 6                      |
| 6          | 7                      | 16         | 11.2                   |
| 7          | 10                     | 17         | 10.2                   |
| 8          | 13                     | 18         | 4.6                    |
| 9          | 5                      | 19         | 7.9                    |
| 10         | 8                      | 20         | 6.3                    |
| Promedio   |                        | mg/L       | 15.95                  |
|            |                        | meq/L      | 0.45                   |

te al 27 % de la PMA, mientras que el balance de agua en el suelo (BAS) estima valores comprendidos entre 36 % y 39 % de la PMA, dependiendo de la fuente de evapotranspiración potencial considerada. (Figura 5).

Si bien se observan diferencias en los valores absolutos, ambas metodologías coinciden en indicar que la recarga representa una fracción significativa de la precipitación anual. En términos relativos, los valores obtenidos mediante el BAS resultan sistemáticamente superiores a los estimados por el método de cloruros, aunque se mantienen dentro del mismo orden de magnitud, permitiendo establecer un rango representativo de recarga para el área de estudio.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de dos metodologías independientes evidencian una concordancia general en las estimaciones de recarga para el acuífero freático de la barrera medanosa. Esta coherencia entre métodos constituye un aspecto relevante, dado que ambos enfoques

**Cuadro 4.** valores anuales de recarga para ambas series y ambos métodos de ETP.

| Pozo         | Ubicación       | CE (μS/cm) | Cl <sup>-</sup> (mg/L) | Cl <sup>-</sup> (meq/L) | FEC |
|--------------|-----------------|------------|------------------------|-------------------------|-----|
| MV1          | 38° 57'55.07" S | 430        | 36.49                  | 1.04                    | 2.3 |
|              | 61° 21'42" O    |            |                        |                         |     |
| MV2          | 38° 57'05.3" S  | 256        | 25.8                   | 0.73                    | 1.6 |
|              | 61° 22'00.2" O  |            |                        |                         |     |
| MV4          | 38° 55'45.2"S   | 640        | 80.7                   | 2.3                     | 5.1 |
|              | 61° 23'05.3" O  |            |                        |                         |     |
| ER4          | 38° 57'14.2" S  | 610        | 85                     | 2.42                    | 5.4 |
|              | 61° 33'48.7" O  |            |                        |                         |     |
| ESI 1        | 38° 55'51.0" S  | 597        | 67.2                   | 1.92                    | 4.3 |
|              | 61° 43'24.6" O  |            |                        |                         |     |
| ESI 5        | 38° 56'49.7" S  | 412        | 58.5                   | 1.67                    | 3.7 |
|              | 61° 41'32.9" O  |            |                        |                         |     |
| Promedio FEC |                 |            |                        |                         | 3.7 |

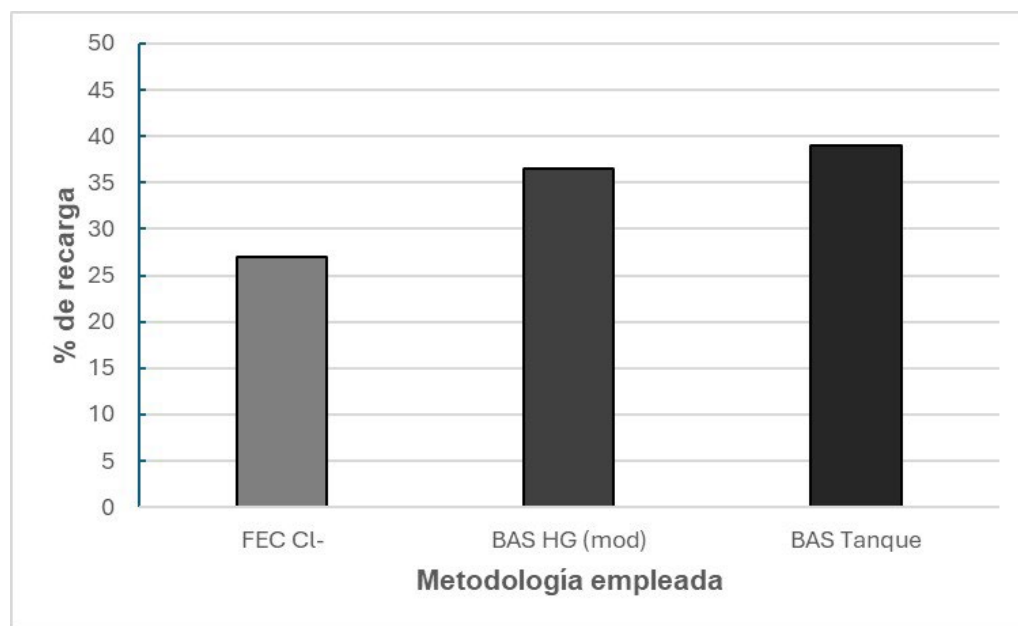
se basan en supuestos y escalas de análisis diferentes, lo que refuerza la consistencia de los valores obtenidos.

El balance de agua en el suelo (BAS) permitió identificar una marcada variabilidad interanual en la recarga, asociada a las fluctuaciones en la precipitación. Este comportamiento ha sido documentado en la región pampeana, donde la variabilidad climática interanual ejerce un control significativo sobre los procesos hidrológicos (Aliaga 2018, Casado y Campo 2019). En este sentido, los resultados obtenidos reflejan la estrecha relación entre la recarga y la precipitación, característica de sistemas acuíferos someros.

La magnitud de la recarga estimada, que representa una fracción significativa de la precipitación anual, es consistente con lo observado en acuíferos desarrollados en medios arenosos de alta permeabilidad. En estos sistemas, la elevada capacidad de infiltración y el escaso desarrollo de escurrimiento superficial favorecen la recarga directa (Al Atawneh et al. 2021, Carrion Melo et al. 2023, Rey et al. 2025).

Por su parte, el método de balance de masas de cloruros proporciona una estimación integrada de la recarga a escala temporal más amplia. La concordancia observada entre este método y el BAS sugiere que, en el área de estudio, los supuestos asociados al carácter conservativo del ion cloruro resultan adecuados. No obstante, este enfoque presenta limitaciones inherentes, vinculadas principalmente a la variabilidad en la deposición atmosférica y a la representatividad de las muestras de agua subterránea (Varni 2013).

En relación con el BAS, las principales fuentes de incertidumbre se asocian a la estimación de la evapotranspiración potencial y a la parametrización del suelo. La utilización de dos fuentes independientes de ETP permitió acotar parcial-



**Figura 5.** Comparación de resultados entre las metodologías de recarga empleadas.

mente estas incertidumbres, observándose que las diferencias en los valores de recarga se mantienen dentro de un rango acotado. Este tipo de sensibilidad ha sido señalado en estudios recientes que analizan la incertidumbre en estimaciones hidrológicas bajo condiciones de variabilidad climática (Kumar et al. 2025).

Un aspecto distintivo del área de estudio es la escasa intervención antrópica. La barrera medanosa presenta, en su mayor parte, condiciones cercanas al estado natural, con predominio de pastizales y una baja intensidad de uso ganadero, junto con la presencia de sectores de acceso restringido. En este contexto, los procesos de recarga se encuentran controlados principalmente por factores climáticos y por las propiedades físicas del medio, minimizando la influencia de cambios en el uso del suelo. Este comportamiento ha sido documentado en otros sistemas hidrogeológicos con bajo grado de intervención antrópica (Carrion Melo et al. 2023).

Estudios realizados en ambientes costeros arenosos de otras regiones, han documentado comportamientos comparables, caracterizados por una alta eficiencia de infiltración y una fuerte dependencia de las condiciones climáticas (Carretero y Kruse 2012, Gumula Kawecka et al. 2022, Sánchez Caro et al. 2023).

La fuerte dependencia de la recarga respecto a la precipitación sugiere, además, una posible influencia de forzantes climáticos de escala regional, como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). En la región pampeana, la relación entre ENSO y las anomalías de precipitación ha sido ampliamente documentada, evidenciando su impacto sobre la disponibilidad hídrica (Ferrelli 2017, Aliaga 2018). En este sentido, los resultados obtenidos son consistentes con un

sistema en el cual la recarga responde principalmente a la variabilidad climática interanual, en concordancia con lo observado en otros sistemas hidrogeológicos someros.

En este contexto, resulta relevante considerar el posible impacto de la variabilidad y el cambio climático sobre los procesos de recarga. Diversos estudios han señalado que modificaciones en los patrones de precipitación y en la evapotranspiración pueden afectar significativamente tanto la magnitud como la temporalidad de la recarga en acuíferos someros (Al Atawneh et al. 2021, Neidhardt y Shao 2023). En particular, se ha destacado que el incremento en la frecuencia de eventos extremos y la variabilidad interanual podrían generar una mayor irregularidad en los procesos de recarga, aun en aquellos sistemas donde la infiltración es eficiente.

En este sentido, investigaciones recientes indican que la respuesta de la recarga frente a escenarios de cambio climático presenta un alto grado de incertidumbre, dependiendo tanto de las condiciones climáticas como de las características del medio físico (Al Atawneh et al. 2021, Kumar et al. 2025). Para sistemas como el analizado, desarrollados en medios arenosos con escasa intervención antrópica, es esperable que la recarga continúe estando fuertemente controlada por la precipitación, aunque con posibles cambios en su distribución temporal y en la ocurrencia de eventos de recarga significativa.

Si bien el presente trabajo no aborda proyecciones climáticas específicas, los resultados obtenidos permiten inferir que futuras variaciones en el régimen de precipitaciones podrían traducirse en modificaciones directas en la recarga del acuífero lo cual resulta relevante para la gestión del recurso hídrico en el área de estudio.

## CONCLUSIONES

La aplicación de dos metodologías independientes permitió estimar la recarga al acuífero freático de la barrera medanososa, obteniéndose valores consistentes y comparables entre sí de entre el 36 y 39 % de la PMA para el balance de agua en el suelo y de 27 % de la PMA para el balance de masas del ion cloruro.

Los resultados evidencian que la recarga presenta una variabilidad interanual significativa, asociada a las fluctuaciones en la precipitación, en concordancia con lo reportado en estudios regionales e internacionales sobre la influencia de la variabilidad climática en sistemas hidrológicos.

Las características geomorfológicas y litológicas del sistema, junto con la escasa intervención antrópica, favorecen condiciones de infiltración que permiten una recarga efectiva del acuífero freático. En este contexto, el área de estudio puede considerarse representativa de un sistema cercano a su estado natural, constituyendo un escenario de referencia adecuado para evaluar los efectos de futuros cambios en el uso del suelo sobre los procesos de recarga.

Las metodologías empleadas presentan limitaciones inherentes a sus supuestos y parámetros de entrada; no obstante, la utilización conjunta de enfoques independientes permite reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones individuales.

Las estimaciones de recarga obtenidas constituyen una base fundamental para la gestión del recurso hídrico y el ordenamiento territorial. Su integración en la toma de decisiones resulta clave para evaluar y anticipar los efectos que podrían afectar al recurso hídrico subterráneo debido a cambios en el uso del suelo y escenarios de variabilidad climática.

## REFERENCIAS

Al Atawneh, D., Cartwright, N. y Bertone, E. 2023. Climate change and its impact on the projected values of groundwater recharge: A review, *Journal of Hydrology*, Volume 601, 126602, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126602>.

Aliaga, V. S. 2018. Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4149>

Almorox, J., Elisei, V., Aguirre, M. E. y Commegna, M. 2012. Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo*, 44(1): 101-109.

Aramayo, S.A., Schillizi, R.A., y Gutierrez Tellez, B.M. 2002. Evolución paleoambiental del Cuaternario en la Costa Atlántica del sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Rev. Soc. Geol. España* 15 (1-2): 95-104.

Auge, M. 2004. Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. Edición del autor.

Barragán J., M. y De Andrés, M. 2016. Expansión urbana en las áreas litorales de América Latina y Caribe. *Revista de Geografía Norte Grande*, no.64. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000200009>. ISSN 0718-3402

Carretero, S. C. y Kruse, E. E. 2012. Evolución del médano costero y efectos sobre la recarga en el acuífero freático en San Clemente del Tuyú. V Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Río Cuarto, Córdoba, Argentina

Carretero, S., Galluzzi, Á. G. y Kruse, E. 2022. Coastal aquifer behaviour related to the textural and mineralogical characteristics of the sands in the eastern coast of the province of Buenos Aires. *Journal of South American Earth Sciences*, 114, 103692.

Carrica, J. C. 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: 243-248.

Carrica J. C. 2009. Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. En *Recarga de Acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas*. Jorge Carrica, Mario Hernández y Eduardo Mariño (Eds). 2009. AIH-Fac. Exactas y Naturales UNLPam. ISBN 978-987-1082-39-1: 71-80. Santa Rosa.

Carrica, J. C., Lexow, C. y Bonorino, A. G. 2012. La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, Prov. de Buenos Aires, Argentina. XI Congreso latinoamericano de Hidrogeología. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias en CD.

Carrica J., Lexow C., Ruffo A. G. y Albouy R. 2018. La importancia hidrogeológica de los cordones medanosos del sudoeste bonaerense de la provincia de Buenos Aires, Argentina. "XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, X Congreso Argentino de hidrogeología, VIII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea". E-Book: García, R., Castro, E., Dornes, P., Kruse, E., Moya Ruiz, F. y García, J. W. (Eds). *El Agua Subterránea: Recurso sin Fronteras: Interacción Agua Superficial Agua Subterránea*. Salta, 2018. ISBN 978-987-633-536-2. Pags: 99-106.

Carrión Mero, P., Olaya, P., Sanango-Ochoa, L., Cano-Alvarado, F., Bravo-Montero, L., Solórzano, J., y Morante-Carballo, F. 2023. Hydrogeological Characterization of a Coastal Area for the Groundwater Exploitation. Hondo River Micro-Watershed, Santa Elena-Ecuador. *International Journal of Sustainable Development & Planning*, 18(2). <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180208>

Casado, A. y Campo, A. M. 2019. Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 58 (1): 6-26.

- Crosbie, R. S., Scanlon, B. R., Mpelasoka, F. S., Reedy, R. C., Gates, J. B., y Zhang, L. 2013. Potential climate change effects on groundwater recharge in the High Plains Aquifer, USA. *Water Resources Research*, 49(7): 3936-3951.
- Custodio, E., Llamas, M. R., y Sahuquillo, A. 2000. Retos de la hidrología subterránea. *Ingeniería del agua*, 7(1), 23-36.
- Edison Consult. 1967. Estudio técnico económico y social Valle Bonae-  
rense Río Colorado. Primera fase. Tomo I. Meteorología, climatología  
y Agrometeorología.
- FAO. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop wa-  
ter requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome,  
300(9), D05109.
- Ferrelli, F. 2017. Efectos de eventos El Niño y La Niña sobre las lagunas  
del sur de la Región Pampeana (Argentina). *InterEspaço: Revista de  
Geografia e Interdisciplinaridade*, 2(6): 122-142.
- Forte Lay, J. A. y Burgos, J. J. 1983. Verificación de los métodos de esti-  
mación de la variación de almacenaje en los suelos pampeanos. Taller  
argentino-estadounidense sobre sequías. Mar del Plata, 1978. Ed.: J.  
J. Burgos. Actas: 162-180, Buenos Aires.
- Geological Survey Water-Supply Paper 1839 D. 1967. Summary of hy-  
drologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed  
by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., Perrone, D., 2020. Global  
Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthro-  
pocene. *Annual Review Earth and Planetary Sciences*. 48:431-463.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Gonzalez, N., 2005. Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de  
Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. Cap.  
XXII: 359-374. La Plata
- Gumula Kawecka, A., Jaworska-Szulc, B., Szymkiewicz, A., Gorczews-  
ka-Langner, W., Pruszkowska-Caceres, M., Angulo-Jaramillo, R., y  
Šimůnek, J. 2022. Estimation of groundwater recharge in a shallow  
sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluc-  
tuation method. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127283>
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspira-  
tion from ambient air temperature. *Am. Soc. Agric. Eng.* 1 (2): 96-99.
- Healy, R. W. y Cook, P. G. 2002. Using groundwater levels to estimate  
recharge. *Hydrogeology journal*, 10(1): 91-109.
- Healy, R. W. 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge univer-  
sity press.
- Isla, F., Caro, L. S., Carretero, S. y Rodrigues Capítulo, L. 2024. Hidro-  
geología de las barreras medanosas de la Provincia de Buenos Aires:  
vulnerabilidad al aumento del nivel del mar. *Revista de la Asociación  
Geológica Argentina*, 81(2).
- Jiries, A. G., Oroud, I. M. y El-Hasan, T. M. 2025. Estimating groundwater  
recharge in a semiarid Mediterranean climate using a daily water ba-  
lance model, GIS tools and chloride mass balance model: the Karak  
Plateau, Jordan. *Hydrogeol J* 33, 1621–1636. <https://doi.org/10.1007/s10040-025-02942-y>
- Kumar, R., Samaniego, L., Thober, S., Rakovec, O., Marx, A., Wanders, N.,  
et al. 2025. Multi-model assessment of groundwater recharge across  
Europe under warming climate. *Earth's Future*, 13, e2024EF005020.  
<https://doi.org/10.1029/2024EF005020>
- Li, M., Xie, Y., Dong, Y., Wang, L. y Zhang, Z. 2024. Review: Recent pro-  
gress on groundwater recharge research in arid and semiarid areas  
of China. *Hydrogeol J* 32, 9–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02656-z>
- Marcomini, S. C., y López, R. A. 2006. Geomorfología costera y explo-  
tación de arena de playa en la provincia de Buenos Aires y sus con-  
secuencias ambientales. *Revista Brasileira de geomorfologia*, 7(2),  
61-71.
- Marcomini S. C., Uehara F. y López R. A. 2005. Morfodinámica costera y  
su aptitud para las explotaciones de áridos para construcción en Pe-  
huen-Có. In: Cabaleri N, Cingolani CA, Linares E, López de Luchi MG,  
Ostera HA, Panarello HO (eds) *Proceedings XVI congreso geológico  
argentino*, La Plata, 20-23 Septiembre-2005.
- Merouchi, H., Bouderbala, A. y Elmeddahi, Y. 2025. Integrating chlori-  
de mass balance and water table fluctuation methods for enhanced  
groundwater recharge estimation in semi-arid regions: a case study  
of the Upper Cheliff Alluvial Aquifer, Algeria. *Acta Geophys.* 73, 5839–  
5854. <https://doi.org/10.1007/s11600-025-01663-w>
- Neidhardt, H., y Shao, W. 2023. Impact of climate change-induced war-  
ming on groundwater temperatures and quality. *Applied Water Scien-  
ce*, 13(12), 235. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02039-5>
- Rey, M., Ruffo, A. G., y Albouy, E. R. 2025. Cuantificación de la recarga  
en el acuífero freático del cordón de dunas septentrional del partido  
de Villarino, sudoeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista De  
Geología Aplicada a La Ingeniería Y Al Ambiente*, 52, e035. <https://doi.org/10.59069/24225703ee035> Rodrigues Capítulo et al., 2017
- Ruffo, A. G. 2022. Hidrogeología de las dunas en el ambiente costero su-  
roccidental de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Tesis Doctoral,  
UNS. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6249>.
- Ruffo, A. G., Rey, M. y Albouy, R. 2025. Groundwater hydrodynamics of  
the sandy coastal aquifer of southwestern Buenos Aires, Argentina.  
Punta Alta-Monte Hermoso sector. *Journal of South American Earth  
Sciences*, 153, 105340. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105340>
- Sánchez, R., Pezzola, N. y Cepeda, J. 1998. Caracterización edafoclimá-  
tica del área de influencia del INTA E.E.A. Hilario Ascasubi, Partidos  
de Villarino y Patagones, provincia de Buenos Aires. *Boletín de divul-  
gación* N° 18. INTA Hilario Ascasubi. 72 pp. (Inédito).
- Sánchez Caro, L., Carretero, S. C., Gaspari, F. J. y Rodríguez Vaga-  
ría, A. M. 2023. Estimación de la variación en la recarga del acuífe-  
ro costero en Mar de las Pampas, Argentina, con base en cambios  
del uso del suelo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Editorial: Instituto  
Mexicano de Tecnología del Agua, e-ISSN: 2007-2422. <http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-14-01-02>

- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology journal*, 10(1), 18-39.
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., et al y Treidel, H. 2013. Ground water and climate change. *Nature climate change*, 3(4), 322-329.
- UN-DESA, 2013. World Population Prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.228.
- Varni, M. R. 2013. Aplicación de varias metodologías para estimar la recarga al acuífero pampeano, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(3), 67-85.