

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**DINÁMICA ESTACIONAL DE LA RECARGA SUBTERRÁNEA EN CHILE  
CENTRAL: INFLUENCIA DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES Y LOS  
FLUJOS DE RETORNO POR RIEGO**

**RAYÉN RIVERA V. <sup>1</sup>**  
**JOSÉ LUIS ARUMÍ R. <sup>2</sup>**  
**VICTOR PARRA R. <sup>3</sup>**  
**ALEJANDRA STEHR G. <sup>4</sup>**  
**VERÓNICA OLIVEROS C. <sup>5</sup>**

**RESUMEN**

Las aguas subterráneas son fundamentales para la agricultura y la seguridad hídrica en Chile Central, pero los mecanismos y la dinámica estacional de recarga aún presentan importantes incertidumbres. Este estudio analiza la variabilidad espacial y temporal de la recarga en las cuencas de los ríos Ñuble y Perquillauquén mediante la integración de modelación hidrológica (SWAT) y análisis de isótopos estables. Los resultados muestran que la recarga anual varía entre ~52 y 160 mm/año, con predominio en invierno en la zona cordillerana debido a precipitaciones, acumulación de nieve e infiltración retardada en rocas fracturadas. En verano, la recarga se limita a retornos de riego y flujos laterales desde zonas altas. El análisis isotópico revela un patrón espacial coherente con la distancia a la cordillera: en invierno, las lluvias locales recargan los pozos más distales, mientras que en verano predominan los aportes inducidos por ríos del valle y canales de riego. Estos resultados destacan un régimen dual de recarga y la necesidad de considerar tanto los procesos hidrológicos en altura como los retornos agrícolas locales para una gestión integrada del recurso subterráneo.

---

<sup>1</sup> Doctorado en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Centro ANID CHRIAM - email: rayrivera@udec.cl

<sup>2</sup> Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Chillán, Chile. Centro ANID CHRIAM - email: jarumi@udec.cl

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Concepción, Chile – email: vparrar@udec.cl

<sup>4</sup> Departamento Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile – email: astehr@udec.cl

<sup>5</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Chile - email: voliveros@udec.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

En contextos de cambio climático y sequía prolongada, las aguas subterráneas cumplen un rol clave como fuente estratégica para la agricultura, el abastecimiento humano y el mantenimiento de los ecosistemas. Esto es particularmente relevante en acuíferos aluviales adyacentes a zonas montañosas, donde la recarga depende de una combinación compleja de factores hidrológicos, geológicos y de uso del suelo. Entre los principales mecanismos de recarga se encuentran la infiltración difusa por precipitación, la recarga focalizada a través de cauces, los retornos de riego y la recarga desde sistemas montañosos (MSR), que incluye recarga de frente montañoso (MFR) y desde el bloque montañoso (MBR) (Markovich et al., 2019).

En Chile Central (32°–38°S), región afectada por una megasequía de más de 15 años, la presión sobre los acuíferos se ha intensificado (Alvarez-Garreton et al., 2024; Boisier et al., 2024). La recarga natural ha disminuido significativamente debido a déficits de precipitación superiores al 30%, mientras que la demanda hídrica (particularmente para riego agrícola) ha aumentado. En la zona de estudio, las cuencas de los ríos Ñuble y Perquillauquén, las aguas subterráneas sostienen una agricultura intensiva (cereales, leguminosas, hortalizas, frutales, cultivos forrajeros y viñas), además del consumo urbano y rural. Pese a esta creciente dependencia, los mecanismos que controlan la recarga en esta región aún no han sido caracterizados con precisión, especialmente en lo que respecta al aporte de la Cordillera de los Andes a través de nieve, lluvias orográficas y flujo subterráneo en rocas fracturadas.

Estudios recientes han subrayado la importancia de la recarga montañosa en acuíferos de valle adyacentes, destacando el rol de la zona de transición cordillera-valle (Figueroa et al., 2021; Taucare et al., 2020). Se estima que la recarga de frente montañoso podría representar entre un 5% y un 50% de la recarga total. Sin embargo, persisten vacíos de conocimiento sobre cómo varía estacionalmente la importancia relativa de cada mecanismo.

Este estudio aborda estas brechas mediante una aproximación integrada que combina modelación hidrológica con el modelo SWAT (Arnold et al., 2012), análisis de isótopos estables y el enfoque bayesiano MixSIAR. Se analiza cómo varía la contribución de la recarga según la distancia a la cordillera, desde zonas de montaña hasta acuíferos en el valle agrícola. Los resultados permitirán avanzar en una gestión subterránea más informada, considerando la conectividad hidrológica entre zonas altas y bajas, y el contexto de cambio climático y transformaciones en el uso del suelo.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en las cuencas de los ríos Ñuble y Perquillauquén, abarcando 6.470 km<sup>2</sup> en total (Figura 1). Se diferenciaron dos zonas principales: la zona Cordillerana (3.191 km<sup>2</sup>), con formaciones volcánicas e intrusivas fracturadas, y la zona del Valle (3.279 km<sup>2</sup>), dominada por depósitos aluviales y coluviales que albergan los principales acuíferos de la región.

Para estimar la recarga subterránea se aplicaron dos metodologías complementarias: (1) modelación hidrológica con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), y (2)

análisis de isótopos estables del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) integrados en un paquete de R llamado MixSIAR, que es modelo bayesiano usado para obtener información en base a datos de mezclas y contribuciones relativas de diversas fuentes (Stock et al., 2018).

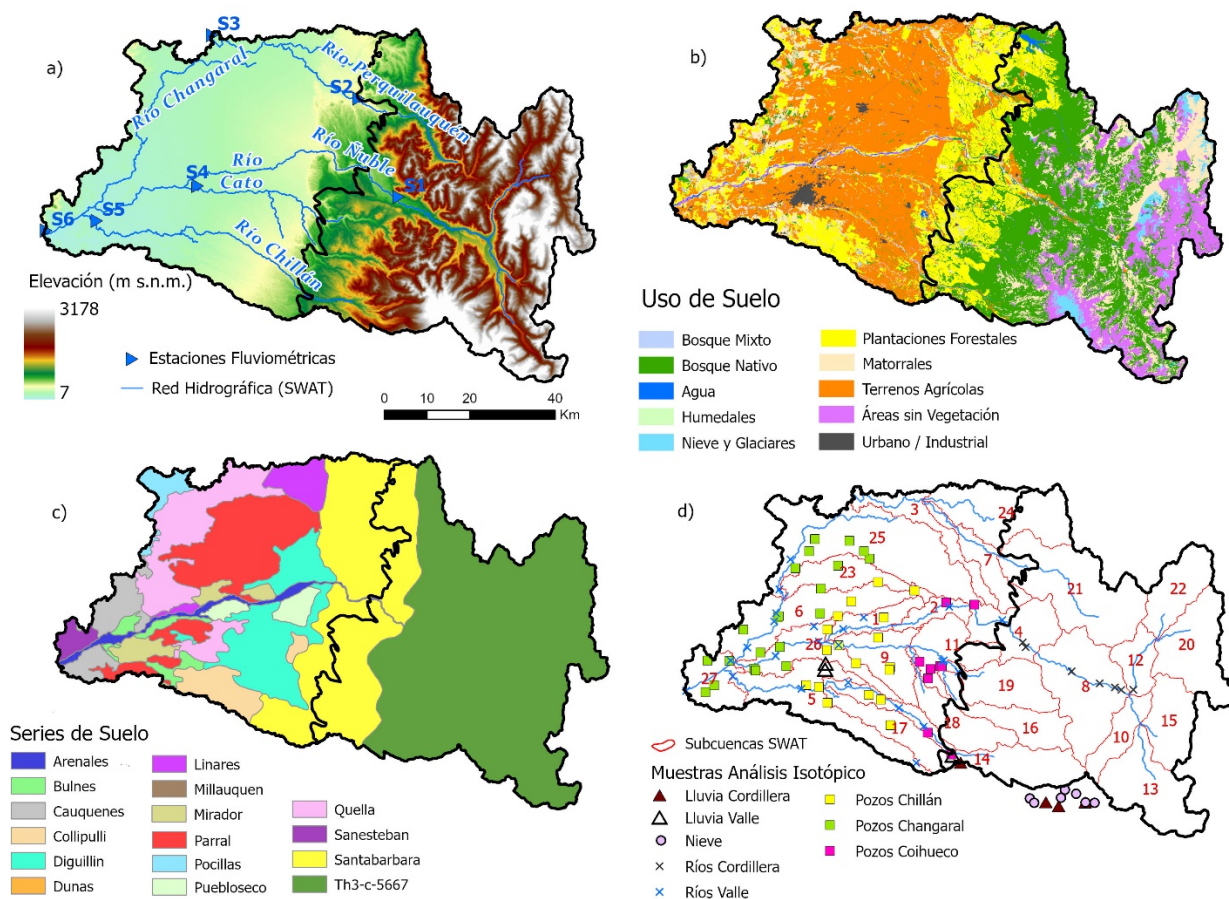


Figura 1. a) Modelo de Elevación Digital; b) Usos de Suelo (CONAF 2015); c) Series de Suelo (CIREN y FAO); y d) Subcuencas generadas en el modelo SWAT y ubicación de las muestras colectadas para análisis isotópico. En los 4 paneles se diferencia la zona de la Cordillera (al Este) del Valle (al Oeste).

La modelación con SWAT consideró datos meteorológicos diarios (precipitación y temperatura, obtenidos del CR2MET<sup>6</sup>), uso de suelo (CONAF 2015; Figura 1b), tipo de suelo (CIREN y FAO; Figura 1c) y topografía (ASTER GDEM; Figura 1a). La cuenca se dividió en 27 subcuencas (Figura 1d) y 990 unidades de respuesta hidrológica (HRU), representando la heterogeneidad espacial de suelos, pendientes y coberturas. La simulación comprendió el periodo 2008–2024, tomando los 4 primeros años para el periodo de calentamiento (2008–2011). La calibración y validación se realizaron con datos diarios de caudal de seis estaciones fluviométricas (Figura 1a), empleando el software SWAT-CUP Premium (Abbaspour et al., 2015). Se ajustaron parámetros clave relacionados con escorrentía, percolación, flujo base y tiempo de retardo en la recarga subterránea.

<sup>6</sup> <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>

La recarga de retorno por riego (RF) se estimó para 133 HRUs agrícolas dentro de subcuencas con alta proporción de riego, aplicando una adaptación del enfoque propuesto por Dewandel et al. (2008). Se calcularon volúmenes de riego aplicados a partir de derechos de agua (superficial y subterránea) y superficie regada según el Censo Agropecuario 2021 (INE, 2022), y se ajustaron según eficiencias de riego diferenciadas por tipo de tecnología. Se incorporaron a la recarga total solo los excedentes respecto a la evapotranspiración real.

Complementariamente, se analizaron 167 muestras isotópicas recolectadas entre 2011 y 2021, incluyendo aguas subterráneas, precipitaciones, nieve y aguas superficiales. Las muestras se agruparon por estación (Verano / Invierno) y por distancia a la cordillera en tres clusters: Coihueco, Chillán y Changaral (Figura 1d). El modelo MixSIAR permitió cuantificar la contribución relativa de cinco fuentes de recarga (lluvia cordillerana y de valle, nieve, ríos cordilleranos y de valle), incorporando incertidumbre mediante simulaciones MCMC. Esta integración metodológica permitió identificar variaciones espaciales y estacionales en los mecanismos de recarga, y evaluar el rol de la cordillera en la recarga de acuíferos del valle.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo hidrológico SWAT presentó un buen desempeño al simular los caudales diarios en las cuencas de los ríos Ñuble y Perquilauquén. Durante el periodo de calibración (2018–2024), los valores de NSE oscilaron entre 0,64 y 0,78, y los de KGE entre 0,64 y 0,81. En el periodo de validación (2012–2017), el NSE varió entre 0,61 y 0,68, y el KGE entre 0,59 y 0,84, lo que confirma la capacidad del modelo para estimar adecuadamente la recarga subterránea.

La recarga presenta una clara diferenciación espacial: aunque la Cordillera y el Valle abarcan superficies similares, la Cordillera aporta en promedio un 56,3% de la recarga anual, frente al 43,7% del Valle (Tabla 1). Esta diferencia se debe a que la Cordillera recibe casi el doble de precipitación (1.792 mm/año), aunque con menor eficiencia de recarga (6,1%) respecto al Valle (8,6%), donde las condiciones geomorfológicas y litológicas favorecen la infiltración y los retornos de riego.

Tabla 1. Resumen de la precipitación anual, la recarga de aguas subterráneas y la eficiencia de recarga para las zonas del Valle Central y la Cordillera, basado en valores promedios del periodo 2012–2024.

Zona	Superficie (km <sup>2</sup> )	Recarga (mm/año)	Recarga Anual (%)	Precipitación (mm/año)	Eficiencia (%)
Valle	3.279	85,1	43,7%	984,5	8.6%
Cordillera	3.191	109,0	56,3%	1791,5	6.1%
Cuenca Completa	6.470	96,9	100%	1389,6	7.0%

En términos temporales, la recarga subterránea varía marcadamente tanto estacional como interanualmente. Años lluviosos como 2017 y 2023 superan los 150 mm/año de recarga, mientras que años secos como 2016 muestran menos de 70 mm/año. Estacionalmente (Figura

2), la recarga se concentra en invierno, con valores máximos (>50 mm) en zonas cordilleranas por acumulación de nieve y lluvias orográficas. En verano, la recarga se restringe a sectores específicos del Valle vinculados a retornos de riego, y a zonas altas de la Cordillera (>1.000 m s.n.m.) donde persiste la infiltración por deshielo. Estos patrones reflejan un régimen estacional: recarga natural en invierno y recarga antropogénica localizada en verano, producida por los flujos de retorno del riego.

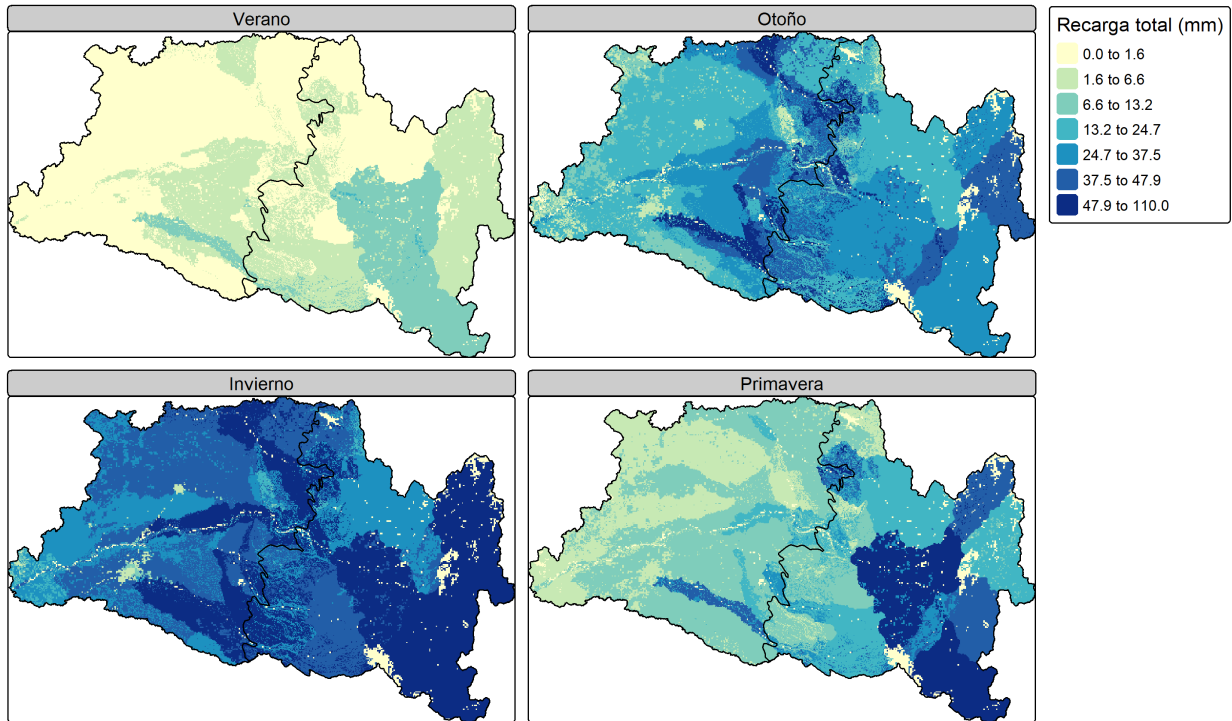


Figura 2. Variación estacional de la recarga total de aguas subterráneas (mm) en el área de estudio. Los mapas muestran la recarga acumulada durante períodos de tres meses para cada estación, y consideran promedios mensuales para el período 2012-2024.

El análisis isotópico confirmó la variabilidad espacial y estacional de las fuentes de recarga (Figura 3). En invierno, las muestras de aguas subterráneas del Valle presentan firmas más enriquecidas, lo que indica predominio de lluvia local y ríos del Valle como fuentes. En cambio, los pozos más cercanos a la Cordillera muestran firmas más empobrecidas, asociadas a precipitaciones de alta elevación. En verano, la composición isotópica de las aguas subterráneas se homogeneiza, pero persiste una señal de lluvia cordillerana, lo que evidencia un aporte sostenido desde zonas altas incluso en estación seca.

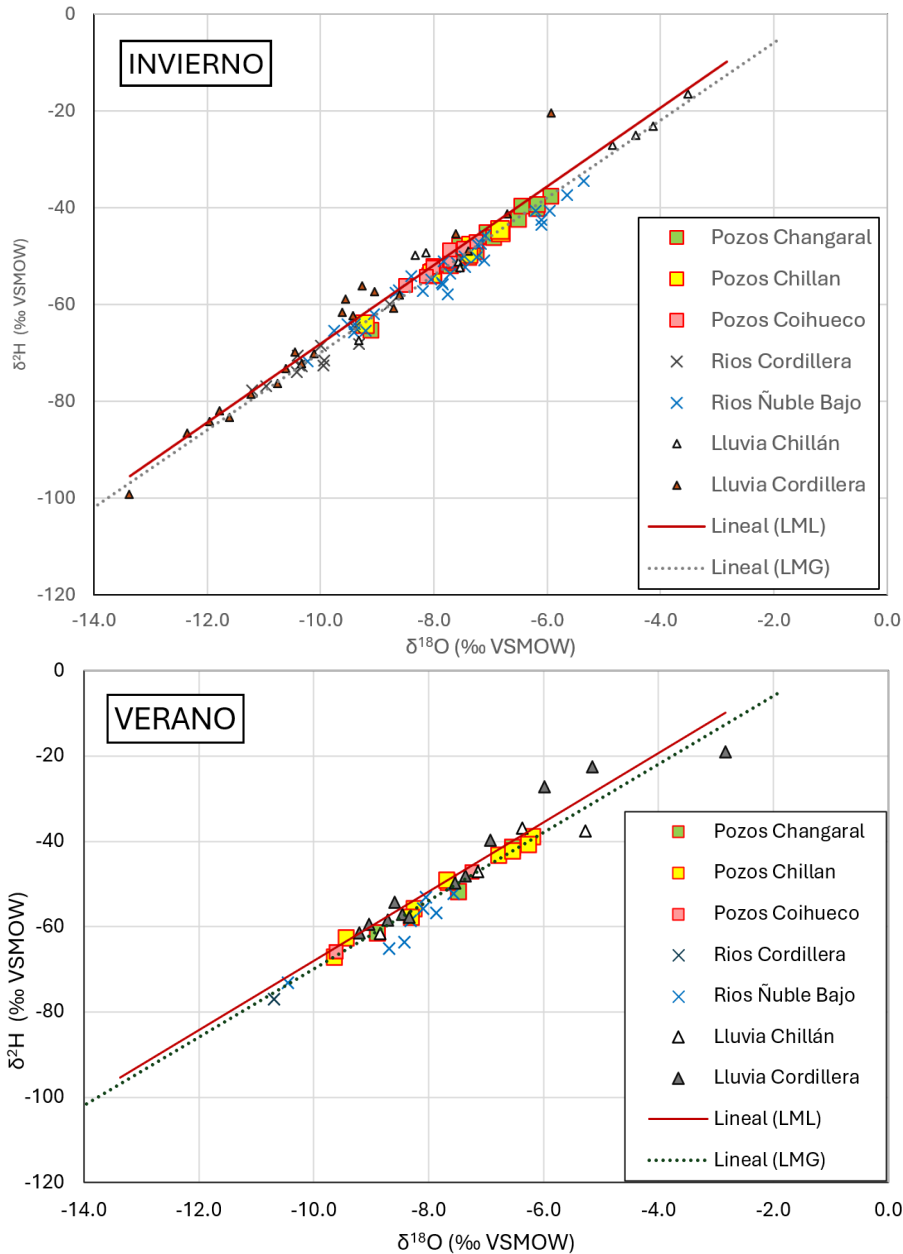


Figura 3. Gráficos  $\delta^{18}\text{O}$  (‰ VSMOW) vs  $\delta^2\text{H}$  (‰ VSMOW) para muestras de distintas fuentes de agua durante el Invierno (arriba) y Verano (abajo). LML = Línea Meteorica Local; LMG = Línea Meteorica Global

El modelo bayesiano (MixSIAR) reveló diferencias marcadas entre estaciones y zonas: la lluvia del Valle (Lluvia local) domina en invierno en las zonas alejadas de la Cordillera, mientras que en verano aumentan los aportes desde ríos del Valle e infiltración lateral desde la montaña, lo que se expresa como una mayor contribución de la Lluvia de la Cordillera en verano (Figura 4). La presencia continua de firmas isotópicas cordilleranas sugiere la existencia de recarga subsuperficial desde rocas fracturadas, que sostienen el sistema acuífero durante todo el año.

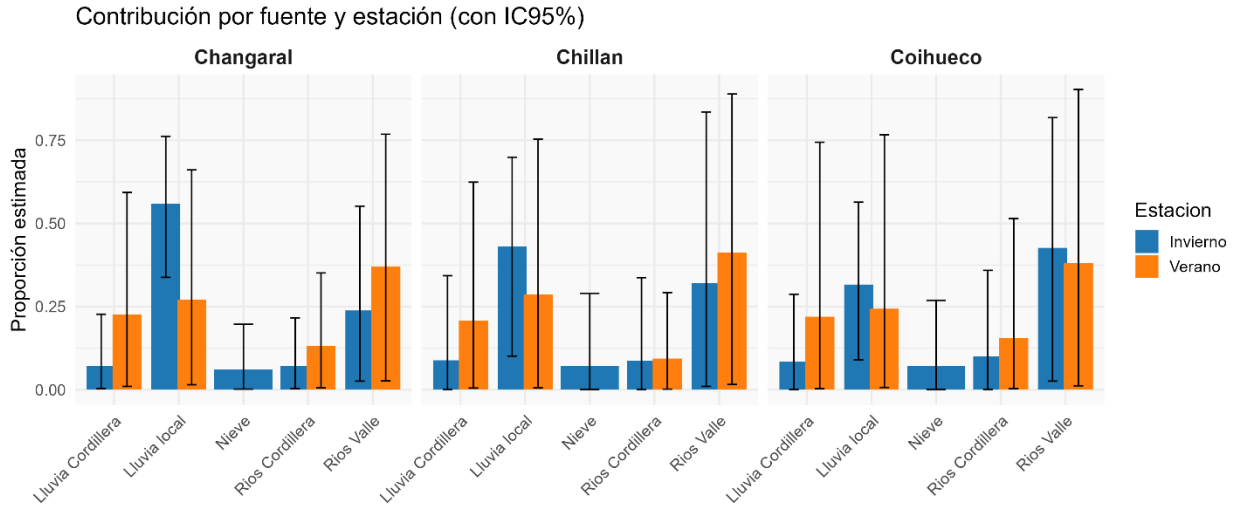


Figura 4. Contribución estacional de diferentes fuentes de recarga a los distintos grupos de pozos, estimada mediante análisis bayesiano con el paquete MixSIAR. Las barras muestran la proporción media estimada para cada fuente, diferenciando entre invierno (azul) y verano (naranja).

#### 4. CONCLUSIONES

A través de la integración de modelación hidrológica con SWAT y análisis isotópicos aplicados a las cuencas de los ríos Ñuble y Perquilauquén, se identificó un régimen dual de recarga, donde los aportes naturales desde la Cordillera predominan durante la temporada húmeda, mientras que los flujos de retorno por riego adquieren relevancia local durante la temporada seca, confirmado por la importante contribución de la firma isotópica de los ríos locales y el riego asociado. Adicionalmente, este estudio da cuenta de la importancia de los flujos subterráneos laterales que aportan a la recarga de acuíferos aluviales del Valle Central desde la Cordillera tanto en invierno como en verano.

La complementariedad entre los resultados del modelo SWAT y el enfoque bayesiano de MixSIAR permite una caracterización robusta de las fuentes y dinámicas de recarga en función de la estacionalidad, la topografía, la geología y el uso del suelo. Este enfoque integrador constituye una herramienta valiosa para mejorar las estimaciones de balance hídrico y apoyar la toma de decisiones en contextos de creciente presión sobre los recursos hídricos. En este sentido, el presente estudio aporta evidencia científica clave para la planificación y gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas, destacando la necesidad de proteger las zonas altas de recarga y considerar la conectividad hidrológica entre la Cordillera y el Valle en estrategias de adaptación frente al cambio climático y la escasez hídrica.

## AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Aguas por autorizar el uso de información generada por INRHED e ingeniería CARASUR en el marco del estudio de “Análisis y Caracterización del Acuífero de la Cuenca del Río Itata”, financiado por el Gobierno Regional de Ñuble. Y al Centro CRHIAM - ANID/FONDAP/1523A0001.

## REFERENCIAS

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., González, J., Rondanelli, R., Gayó, E., & Zambrano-Bigiarini, M. (2024). HESS Opinions: The unsustainable use of groundwater conceals a “Day Zero”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28(7), 1605-1616. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1605-2024>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A., & Van Liew, M. W. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Marinao, R., & Galleguillos, M. (2024). Increasing water stress in Chile evidenced by novel datasets of water availability, land use and water use. *EGUsphere*, 2024, 1-50. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2695>
- Dewandel, B., Gandolfi, J. M., De Condappa, D., & Ahmed, S. (2008). An efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scale. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(11), 1700-1712.
- Figueroa, R., Viguier, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., & Daniele, L. (2021). Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment*, 771, 145456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>
- Markovich, K. H., Manning, A. H., Condon, L. E., & McIntosh, Jennifer C. (2019). Mountain-Block Recharge: A Review of Current Understanding. *Water Resources Research*, 55(11), 8278-8304. <https://doi.org/10.1029/2019wr025676>
- Stock, B. C., Jackson, A. L., Ward, E. J., Parnell, A. C., Phillips, D. L., & Semmens, B. X. (2018). Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. *PeerJ*, 6, e5096.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguier, B., Vallejos, A., & Arancibia, G. (2020). Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile [Article]. *Science of the Total Environment*, 722, 17, Article 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>