



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos  
Hídricos

**Rol de los glaciares de montaña y controles físicos en  
la dinámica hidrológica de las cuencas de cabecera de  
los Andes Húmedos.**

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Agrícola

ELIZABET DANIELA LIZAMA MONTECINOS  
CHILLÁN-CHILE  
2024

Profesor Guía: Dr. Mario Lillo Saavedra  
Departamento de Recursos Hídricos  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Profesor Guía

---

Dr. Mario Lillo Saavedra  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora Interna:

---

Dr. Sebastián Krogh Navarro  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora Externa:

---

Dr. Marcelo Somos Valenzuela  
Facultad de Ciencias Agropecuarias y  
Medioambiente  
Universidad de La Frontera

---

Dr. Diego Rivera Salazar  
Facultad de Ingeniería  
Universidad del Desarrollo

Director de Programa

---

Dr. Octavio Lagos Roa  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
1. Introducción .....	1
2. Metodología .....	8
2.1. Área de estudio.....	8
2.2. Recolección muestras .....	12
2.3. Análisis de muestras.....	13
2.4. Modelo de mezcla bayesiano MixSIAR .....	14
2.5. Análisis PCA de las variables físicas de las cuencas.....	17
3. Resultados .....	22
3.1. Caracterización isotópica de las cuencas .....	22
3.2. Variabilidad espacio temporal de las contribuciones de las fuentes al caudal .....	25
3.3. Análisis PCA de las variables físicas de las cuencas.....	32
4. Discusiones.....	34
4.1. Variabilidad espacio temporal de la contribución de las fuentes en las cuencas anidadas .....	34
4.2. Relación entre características físicas involucradas en generación de escorrentía y contribuciones de fuentes al caudal.....	37
4.3. Implicancias del deshielo glaciar en la hidrología de cabeceras de cuencas de los Andes Húmedos .....	41
4.4. Limitaciones, recomendaciones e implicancias del estudio .....	42
5. Conclusiones .....	45
6. Referencias.....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de ubicación y área de estudio. Se utilizó el inventario de glaciares 2022 de la Dirección General de Aguas (DGA) (<https://dga.mop.gob.cl/Paginas/InventarioGlaciares.aspx>) y DEM SRTM de 30 fue descargado desde la plataforma web EarthExplorer (EE), del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)..... 11
- Figura 2.** Flujo metodológico realizado para determinar las proporciones de las fuentes al caudal. Incluye el muestreo de las fuentes y el caudal, análisis de laboratorio y procesamiento de los datos de isótopos estables en MixSIAR. Las proporciones de las fuentes en el gráfico son solo ilustrativas, no corresponden a porcentajes reales obtenidos..... 17
- Figura 3.** Gráfica de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  de las distintas fuentes de agua y la escorrentía en la cuenca del río Allipén. La línea negra continua representa la Línea Meteorológica Global (GMWL), la línea negra discontinua representa la Línea Meteorológica Local (LMWL) ( $R^2 = 0,91$ ). Los símbolos de colores representan las diferentes fuentes..... 25
- Figura 4.** Gráfico de isoespacio que muestra las firmas isotópicas de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  para distintas fuentes de agua en las cuencas A1, A2, A3, A4 y A5. Los puntos negros representan los centroides que indican la media de las firmas isotópicas para cada fuente de agua (nieve, glaciar y laguna). Las líneas punteadas y continuas alrededor de cada centroide ilustran la desviación estándar de las mediciones. Los puntos de colores representan la firma isotópica del caudal en los diferentes periodos. Este gráfico proporciona una visualización de la dispersión isotópica y la incertidumbre asociada..... 29

**Figura 5.** Estimación de las proporciones media para cada cuenca anidadas (A1, A2, A3, A4) y para la cuenca del río Allipén integrando todas cuencas menores (A5) en los diferentes periodos de tiempo. La desviación estándar para cada fuente esta representadas por barras de error. También se muestra un mapa de la ubicación de las cuencas anidadas realizado a partir de una imagen Sentinel en falso color, para resaltar las características topográficas y de cobertura del área de estudio (f)..... 31

**Figura 6.** Biplot generado a partir de un análisis de componentes principales (PCA). muestra las puntuaciones de los componentes principales de las cuencas (puntos) y las cargas de las variables (vectores)..... 33

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Variables físicas de las cuencas utilizadas en análisis PCA..... 20

**Tabla 2.** Valores isotópicos de las fuentes y número de muestras (n) por cuenca. Los valores de las fuentes están representados por la media y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los datos. .... 24

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería (CRHIAM), a la beca ANID de magíster nacional (22221693) y a los proyectos ANID/FONDAP/15130015, ANID/FONDAP/1523A0001, Fondequip (EQM230105) y Anillo ACT210080 por financiar esta tesis.

Agradezco a toda la comisión por la confianza que depositaron en mí y cada uno de los valiosos aportes que hicieron posible este trabajo.

Agradezco a Bastian por su gran ayuda en terreno y su apoyo constante en el desarrollo de este trabajo.

## RESUMEN

Los Andes de sur de Chile cuentan con glaciares aislados alojados sobre centros volcánicos que, junto a la precipitación, contribuyen a varios sistemas fluviales importantes en la región. La disminución de la extensión de los glaciares, así como la tendencia negativa de la precipitación reducirá la cantidad de agua disponible cuenca abajo. Sin embargo, los estudios sobre sensibilidad de los sistemas hidrológicos frente al cambio climático se centran mayormente en zonas áridas y semiáridas de los Andes, respecto de regiones húmedas donde existen glaciares de montañas aislados. A pesar de la extensión e importancia hidrológica los Andes Húmedos no existen estudios que permitan comprender la importancia de sus glaciares en la generación del caudal, aunque desde hace varios años existen tendencias significativas de caudal decrecientes que afectan la región. Mediante monitoreo isotópico estimamos la contribución del deshielo glaciar en las cuencas anidadas de la cuenca de cabecera del río Allipén en los Andes húmedos (entre los 38°40'S y 39°S). Se utilizaron mediciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  a escala estacional durante seis temporadas en manto nival, lluvia, derretimiento glaciar, lagunas, manantiales y ríos. Los datos de isótopos estables se analizaron en un marco bayesiano usando el modelo Misia donde se incorporaron relaciones espaciales y temporales. Los resultados indican que las respuestas de las cuencas anidadas varían. La contribución de los manantiales es prominente en tres de las cuatro cuencas anidadas a lo largo del período analizado. En una de las

cuencas, las lagunas corresponden a la fuente contribuyente principal. Además, la contribución del deshielo glaciar alcanzó hasta un 30% en otra de las cuencas anidadas. Mientras tanto, la precipitación fue menos importante en todas las cuencas. Al analizar la cuenca completa (sin el enfoque de cuencas anidadas), los resultados muestran el dominio de las contribuciones de manantiales como la fuente principal, variando entre 56% y 62%, seguido por lagunas, que varían entre 13,5% y 23%. En contraste, el deshielo glaciar varía entre 11% y 18%, aunque solo cubre aproximadamente el 1,5% del área total de la cuenca. Estos resultados muestran la variabilidad de los procesos hidrológicos en diferentes escalas espaciales y la importancia de pequeños glaciares de montaña en las cuencas de los Andes Húmedos. Además, el análisis de las variables físicas de las cuencas permite identificar la importancia del paisaje volcánico en la dinámica hidrológica de la región. Nuestros resultados sugieren que, debido al cambio climático, es necesario evaluar y cuantificar los cambios en la dinámica del flujo en regiones húmedas, especialmente en cuencas que reciben contribuciones significativas de glaciares en retroceso. Estos resultados permitirán la identificación de nuevos puntos y técnicas de monitoreo para discriminar y cuantificar la contribución de diferentes fuentes y la identificación de áreas o procesos hidrológicos relevantes en términos de conservación o manejo integrado.

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la disponibilidad de agua en las cabeceras de cuencas es esencial para la gestión de los recursos hídricos. Las cuencas de cabecera generalmente contienen glaciares y la precipitación de invierno se almacena como nieve y hielo que se libera durante las estaciones de deshielo de primavera y verano (Junglas et al., 2011). Sin embargo, el retroceso de los glaciares, los cambios en los patrones de acumulación de nieve y los potenciales cambios en la escurrimiento desafían la sostenibilidad de los recursos hídricos a nivel mundial (Husos & Hock, 2018). En áreas húmedas, las montañas suministran hasta el 20-50 % de la descarga total de agua (Viviroli et al., 2007) de las cuencas que desembocan en el mar. Por lo tanto, el deshielo nival y el deshielo de los glaciares de las cuencas hidrográficas son procesos hidrológicos clave para múltiples actividades humanas, como la agricultura, la producción de energía, el suministro/calidad del agua y el turismo (Somers & McKenzie, 2020).

Se espera que los glaciares y la capa de nieve estacional cambien la capacidad de almacenamiento de agua and suministro aguas abajo debido a los cambios en el clima (IPCC, 2021; Kaser et al., 2010). En la última década, los glaciares de los Andes de Chile han sufrido una creciente pérdida de masa (Barcaza et al., 2017; Dussailant et al., 2019; Farías-Barahona et al., 2019), también ha ocurrido un déficit sostenido de precipitaciones (Garreaud et al., 2020) y una

disminución promedio de ~12 % por década de la capa de nieve durante la estación seca (Cordero et al., 2019). Se espera que los cambios en el clima continuarán afectando los patrones de precipitación (Araya-Osses et al., 2020; Boisier et al., 2016; IPCC, 2021), la acumulación de nieve (Cordero et al., 2019) y el ritmo del derretimiento glaciar (Dussailant et al., 2019). Además, modelos recientes en otras regiones montañosas, indican que las pérdidas en la capa de nieve serán mayores en torno a la elevación de la isoterma cero donde es más probable que las temperaturas excedan los 0 °C y un aumento de la precipitación de lluvia frente a la de nieve (Li et al., 2017; Livneh & Badger, 2020). Estos antecedentes exigen un mayor conocimiento de las salidas de agua en las cuencas de cabecera de los Andes. En este sentido, es fundamental la caracterización de las fuentes de escorrentía superficial e identificar los procesos que afectan la disponibilidad de agua en la cuenca.

En Chile los estudios existentes sobre componentes del caudal se concentran principalmente en los Andes Secos entre los 20° S y los 36°47'S (Bravo et al., 2017; S. Crespo et al., 2017; Ohlanders et al., 2013; Scheihing et al., 2018). Por otro lado, la cantidad de estudios realizados en las cuencas de cabecera de los Andes Húmedos, situadas en la región glaciológica Sur donde los glaciares se alojan en centros volcánicos (entre los 36°S y 46°S), es limitada. Esta escasez se debe principalmente a la falta de datos hidrogeológicos e hidrométricos necesarios para desarrollar modelos fiables. Estos modelos son esenciales para verificar si los cambios observados en otras latitudes también

se producen en estas áreas, que generalmente se consideran ricas en agua ('water-rich'). La falta de datos y modelos dificulta la capacidad para predecir cómo la reducción de los glaciares de los Andes Húmedos y las variaciones de la cobertura nival afectarán los recursos hídricos, pero también afecta la capacidad actual de evaluar la disponibilidad de recursos hídricos data la sequía generalizada en la zona centro sur del país (Garreaud et al., 2020).

Existen diversos enfoques para separar la contribución de diferentes fuentes de agua en la generación de escorrentía. En zonas de montaña los estudios comúnmente se centran en cuantificar las contribuciones del derretimiento de la nieve y los glaciares por separado, a partir de: mediciones directas de la escorrentía de los glaciares en verano y/o registro de caudal en cabeceras glaciadas (Gascoin et al., 2013; Schaffer et al., 2019); productos satelitales que permiten separar contribución glaciar de nival (Armstrong et al., 2019) y modelado hidrológico (Finger et al., 2015; Z. H. He et al., 2015; Nesterova et al., 2021; Wang et al., 2019). Sin embargo, la fiabilidad de los modelos hidrológicos se ve significativamente limitada en áreas con escasas observaciones de caudales y una baja densidad de datos hidrometeorológicos, tanto en términos de tiempo como de espacio. Esta limitación es particularmente evidente en zonas montañosas, donde la heterogeneidad de los procesos hidrológicos (Chen et al., 2017; Sucozhañay & Céleri, 2018; van Tiel et al., 2020) presenta un desafío adicional. En estas áreas, la complejidad de los procesos que son difíciles de representar en los modelos hidrológicos se ve agravada. Un

aspecto crítico en este contexto es la importancia de la hidrogeología y su relación con los límites de las cuencas superficiales, cuya influencia a menudo se pasa por alto en los modelos convencionales.

Los trazadores hidrológicos son ampliamente utilizados para cuantificar los componentes de generación de caudales (i.e. separación de hidrogramas), y comprender los diferentes procesos del ciclo hidrológico (Penna & van Meerveld, 2019). Particularmente, los isótopos estables de hidrogeno  $^1\text{H}$  y  $^2\text{H}$  (deuterio) y de oxígeno  $^{16}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$  (oxígeno-18) son parte de la molécula de agua y, por lo tanto, son trazadores poderosos para seguir el movimiento del agua (Björn Rodriguez et al., 2021). Durante los cambios de fase un pequeño cambio registrado por una diferencia en la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno constituye una huella isotópica única del agua en cada etapa del ciclo hidrológico. Así, el agua cuenta con un registro isotópico característico de las fuentes de origen (McGuire & McDonnell, 2006). En este sentido, los isótopos estables del agua han demostrado ser una herramienta eficiente en la investigación de los ciclos hidrológicos locales, regionales y globales (Bowen et al., 2019; Jasechko et al., 2016; Petermann et al., 2018). Las técnicas isotópicas han sido aplicadas en el estudio hidrológico de forma independiente o en combinación con métodos geoquímicos y/o hidrométricos (Crespo et al., 2017; Z. He et al., 2019), en diversas escalas temporales y espaciales, y con frecuencias que pueden ir desde muestreos continuos diarios durante varios años (Von Freyberg et al., 2022) hasta muestreo discretos que involucran solo

un periodo de medición (Sepúlveda et al., 2022). Recientemente, los métodos isotópicos se han utilizado para investigar distintos procesos del ciclo hidrológico, tales como descifrar los componentes de la escorrentía, determinar la contribución de las fuentes de origen y estimar los tiempos de tránsito (H. Chen et al., 2019; Correa et al., 2017; Feng et al., 2022; Wan et al., 2020), estudiar interacciones entre el agua superficial y subterránea (Hokanson et al., 2022; Yang et al., 2021), realizar balances hídricos en lagos (Petermann et al., 2018; Wan et al., 2020), estudiar la partición de la precipitación (Kirchner & Allen, 2020), establecer los tiempos de residencia, identificar los mecanismos y áreas de recarga de acuíferos (Carretero et al., 2022; X. Chen et al., 2018; Eastoe & Wright, 2019; Peters et al., 2018), e identificar las fuentes de agua específicas y las proporciones utilizadas por los bosques alpinos (Dwivedi et al., 2020; Langs et al., 2020; Zhang et al., 2022).

Los isótopos estables permiten estimar las proporciones de contribución del agua de deshielo a la escorrentía. Por ejemplo, Ohlanders et al. (2013) y Rodriguez et al. (2016) examinaron una cuenca semiárida de los Andes en Chile Central a los 32°55'S, destacando la relevancia del deshielo glaciar. En la misma región, Crespo et al. (2020) observaron variaciones en la contribución de diferentes fuentes hídricas, incluyendo agua subterránea y glaciar. En los Andes argentinos, Reato et al. (2022) identificaron la variabilidad estacional de las fuentes de agua y destacaron la importancia de los depósitos glaciales y periglaciales como reservorios que liberan agua en la estación más cálida. Mas al norte,

Baraer et al. (2015) estudiaron la Cordillera Blanca en Perú, enfatizando el papel crucial del agua subterránea, especialmente durante la estación seca. Por su parte, Saberi et al. (2019) analizaron una cuenca en Ecuador, revelando la importancia del agua de deshielo en diferentes proporciones durante la estación seca, y la influencia de la lluvia en el derretimiento glacial. Cowie et al. (2017), en Colorado, USA, y Pu et al. (2017) en la meseta tibetana, resaltaron la importancia del deshielo y el agua subterránea como fuentes principales de caudal. Mientras que Chang et al. (2018) y Williams et al. (2016) demostraron la relevancia de pequeños glaciares y acuíferos en cuencas del Tibet y los Himalayas, destacando variaciones en la contribución del agua glacial y subterránea a lo largo del año.

A pesar de la extensión e importancia hidrológica de los Andes Húmedos no existen estudios que permitan comprender la generación del caudal en esta zona, aunque desde hace varios años las existen tendencias significativas de caudal decrecientes que afectan esta región (37,5°S y 40°S) (Rubio-Álvarez & McPhee, 2010). En general los estudios isotópicos en agua no son frecuentes en regiones húmedas tal es el caso de los Andes Húmedos chilenos (entre los 35°S - 41°S) (Nan et al., 2019). Markovich et al. (2019) en la transición de los Andes Secos y Húmedos (36°48'S) encontró que el agua subterránea es la principal fuente de caudal en la cuenca de montaña del río Diguillín. Mas al sur en los 41°12'S, Sepúlveda et al. (2022) estudiaron la cuenca del río Manso en la Patagonia Argentina, encontrando que el agua de deshielo de los glaciares

ubicados en la vertiente occidental del Volcán Tronador es el principal contribuyente de agua en la cuenca a principios del otoño. En consecuencia, las contribuciones del agua de deshielo nival y el derretimiento glaciar en la escorrentía superficial no son lo suficientemente conocidas en esta zona, como para predecir el efecto que tendrá el receso de la criosfera y las variaciones de precipitación en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Para estrechar la brecha de conocimiento respecto de los procesos hidrológicos en cuencas de cabecera proglaciares de los Andes Húmedos del sur de Chile, cuantificamos las fuentes de generación de caudales de una importante cabecera de cuenca. La subcuenca del Río Allipén se caracteriza por recibir aportes de deshielo de nieve estacional y aguas del glaciar Sollipulli, este último emplazado en la caldera de ~4 km de ancho del volcán homónimo. Este importante glaciar contiene 4,5 km<sup>3</sup> de hielo hasta una profundidad máxima de 593 m (Lachowycz et al., 2015). La cuenca posee un paisaje dominado por actividad volcánica, limitando con tres centros volcánicos entre ellos el volcán Llaima, uno de los más activos de Chile. Además, gran parte de la cuenca corresponde a áreas naturales protegidas como parque y reservas nacionales de gran interés científico y turístico en la región. Tenemos por objetivo estimar los componentes de la escorrentía, mediante modelos de mezcla en las cabeceras de cuenca de los Andes Húmedos y responder a la pregunta ¿Cuál es la contribución del derretimiento glaciar en la generación de caudal en la cabecera de cuenca del Río Allipén?

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Área de estudio**

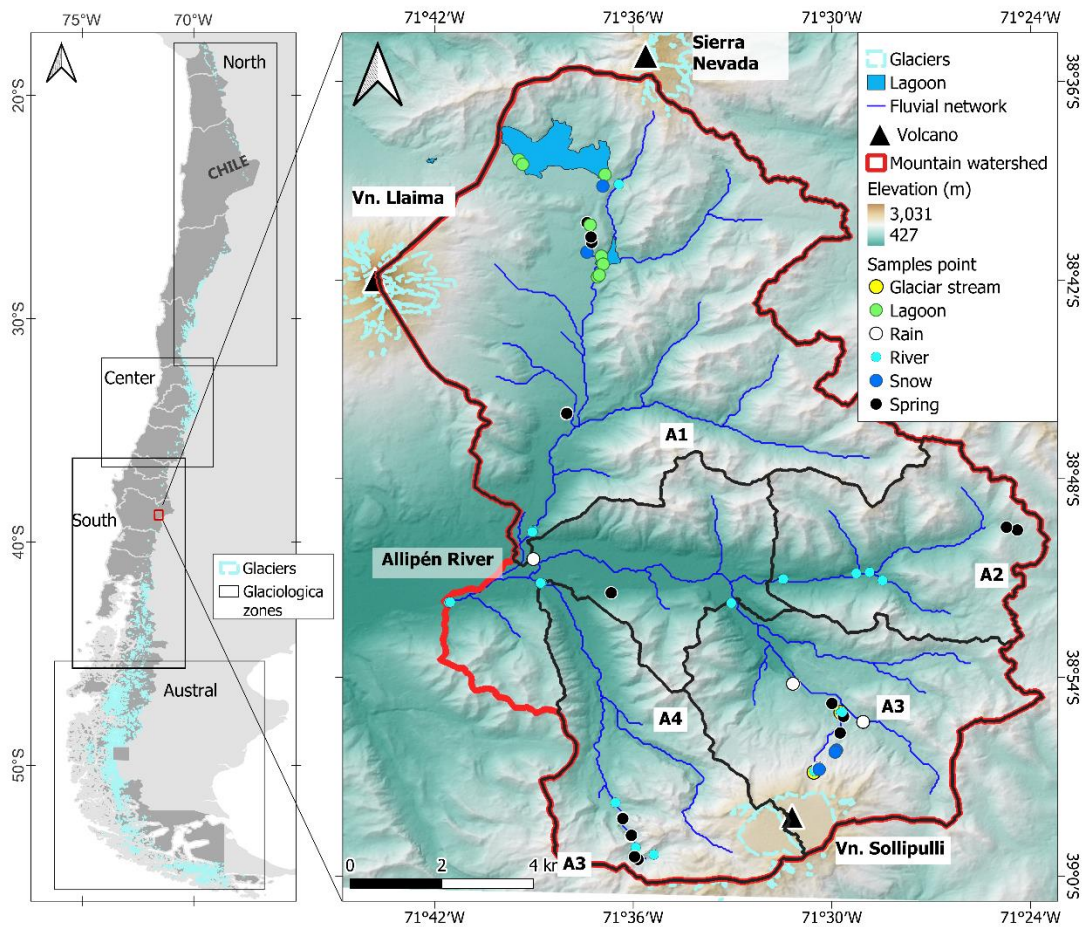
El área de estudio corresponde la cuenca del Río Allipén ( $38^{\circ}40'S - 39^{\circ}S$ ) ubicada en Melipeuco en los Andes del sur de Chile (Figure 1). La zona de estudio se ubica dentro áreas reconocidas como parques y reservas nacionales por lo tanto no existe gran intervención antropogénica dentro de sus límites. La mayor parte de la población se ubica en el centro poblado Melipeuco ubicado en la salida de la cuenca ( $38^{\circ} 51' 8.30''S - 71^{\circ} 41' 34.59''W$ ). Las condiciones naturales y poco intervenidas hacen de estas áreas un laboratorio natural ideal para estudios el movimiento del agua y las fuentes de escorrentía superficial.

El área de estudio se circunscribe a la región glaciológica Sur según la división de Las zonas glaciológicas del CECS (2009) (Sur  $36-46^{\circ}S$ ). En esta zona los glaciares se alojan en centros volcánicos sobre los 1.500 m.s.n.m. La cuenca de estudio se ubica en la zona cordillerana de la región de la Araucanía, un área donde el caudal ha disminuido con el período más seco de la última década (Masiokas et al., 2020). En cuanto a las características climáticas, la cuenca se clasifica con régimen pluvio-nival y un clima con influencia mediterránea de lluvias frías moderadas que disminuyen significativamente durante los meses de verano, cuando se presentan las temperaturas más altas (Fernández-Alberti et al., 2021). La temperatura media anual de la zona de estudio es de  $10.2^{\circ}C$  con un promedio máximo en el mes de enero-febrero de

15.8°C. La temperatura mínima promedio alcanza los 4.7°C entre junio y julio. Respecto de los caudales, estos presentan dos máximos relativos, uno concentrado durante los meses de mayores precipitaciones entre julio y septiembre y otro que se produce en los meses de primavera, asociado al derretimiento de nieve. El relieve es irregular y accidentado, modelado principalmente por acción glaciaria y actividad volcánica. Abarca desde valles bajos hasta ladera altas con fuertes pendientes, en un rango de elevación de 520 a 3000 msnm. La zona se emplaza en el cordón volcánico activo, con volcanes Llaima (3100 m s.n.m.) y Sollipulli (2.282 m s.n.m.) que corresponden a las cumbres más altas de la cuenca junto al volcán inactivo Sierra Nevada (2554 m s.n.m.). En esta área se presentan principalmente rocas de origen volcánico (lavas y depósitos piroclásticos), también rocas intrusivas y sedimentos inconsolidados de origen glaciario, fluvial y derivados de actividad de deslizamientos que rellenan los valles del área (Suárez & Emparan, 1997). Esta área se encuentra dentro del dominio del sistema de fallas Liquiñe-Ofqui, que corresponde a un complejo sistema de fracturas corticales que se extiende por aproximadamente 1200 kilómetros en el sur de los Andes de Chile responsable del volcanismo activo y del fracturamiento de las rocas (Pérez-Flores et al., 2016).

La cuenca del río Allipén se dividió en otras 4 subcuencas de cabeceras (ver Figura 1) para realizar un análisis de cuencas anidadas, pues cada una tiene características que las hace particularmente únicas para investigar los

mecanismos de generación de escorrentía (Tabla 1). Por ejemplo, la cuenca A1 cuenta con lagos y lagunas, la cuenca A2 no presenta glaciares ni lagos, mientras que la cuencas 3 y 4 cuencas con el glaciar Sollipulli. Con ello, el punto de salida de la cuenca, integra los procesos de las 4 subcuencas, mientras que se incluyen puntos de monitoreo a la salida de cada una de las subcuencas. Con esto, es posible aplicar diferentes modelos de mezcla de cada subcuenca que se ajusten al comportamiento integrado. La cuenca del río Triful-Triful (**cuenca A1**) abarca la cabecera noreste y nace desde las faldas del Volcán Llaima y la ladera sur del volcán extinto Sierra Nevada, esta zona forma parte del Parque Nacional Conguillio, un área con un paisaje intervenido por la actividad volcánica del volcán Llaima con ríos y lagunas represadas por lavas. Por su parte, la cuenca del río Tracura (**cuenca A2**) que forma parte de la vertiente este, es la subcuenca de menor tamaño, pero de mayor elevación media. En la vertiente Sur nacen las cuencas del río Curilafquen (**cuenca A3**) y del río Alpehue (**cuenca A4**), ambas subcuencas reciben agua del glaciar Sollipulli ubicado sobre el centro volcánico del mismo nombre.



**Figura 1.** Mapa de ubicación y área de estudio. Se utilizó el inventario de glaciares 2022 de la Dirección General de Aguas (DGA) (<https://dga.mop.gob.cl/Paginas/InventarioGlaciares.aspx>) y DEM SRTM de 30 fue descargado desde la plataforma web EarthExplorer (EE), del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

## **2.2. Recolección muestras**

Se seleccionaron sitios de muestreo cuidando incluir todas las fuentes de agua que aportan a la escorrentía superficial. En este sentido el muestreo isotópico se realizó en precipitación (nieve y lluvia), lagunas, vertientes y fuentes de agua superficiales. Además, se buscó incluir puntos de muestreo representativos del gradiente altitudinal de las cuencas de cabecera, además de puntos de ríos principales y tributarios, incluyendo la escorrentía derivada directamente de la fusión glaciar (Figura 1, Tabla 2).

Las fechas de muestreo isotópico representan distintos periodos del año hidrológico 2022 y 2023. En el caso de las muestras de agua de deshielo glaciar, estas se recolectaron durante el verano al final del año hidrológico. Mientras que las muestras de nieve se recogieran mensualmente durante la temporada de nieve. Se consideraron muestras integradas en profundidad de la capa de nieve. En total se recolectaron 119 muestras de fuentes y corrientes superficiales (mix). Tanto la ubicación como la frecuencia de muestreo fue dictada por la facilidad de acceso y las condiciones climáticas del área de estudio. Las muestras de agua se recolectaron en botellas de plástico de alta densidad de 50 ml, las muestras de nieve se recolectaron tomando todo el perfil de nieve en envases de plásticos de 5 litros y se dejaron derretir a temperatura ambiente, luego el agua fue transferida a botellas plásticas de alta densidad de 50 ml.

### 2.3. Análisis de muestras

Cada molécula de agua (H<sub>2</sub>O) está formada por dos átomos de hidrógeno (H) y uno de oxígeno (O). No obstante, estos átomos no siempre son iguales ya que de forma natural en el agua se pueden encontrar dos isótopos estables de hidrógeno (<sup>1</sup>H y <sup>2</sup>H) y tres de oxígeno (<sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O y <sup>18</sup>O), de los cuales el <sup>1</sup>H, <sup>2</sup>H, <sup>16</sup>O y <sup>18</sup>O son los más abundantes. Los isótopos de un mismo elemento son químicamente idénticos, pero debido a las diferencias de peso atómico, se comportan físicamente diferente (Penna & van Meerveld, 2019). Esta característica permite distinguirlos usando espectrometría de masas para “pesarlos” y medir sus concentraciones en el agua. La diferencia en el número de neutrones hace que cada isótopo pese diferente, y esta diferencia de peso es clave para los estudios hidrológicos (Ortega & Gil, 2019).

La abundancia de isótopos de agua estables se basa en las proporciones isotópicas (<sup>18</sup>O/ <sup>16</sup>O y <sup>2</sup>H/ <sup>1</sup>H). La abundancia se informa en la notación δ y se expresa como partes por mil (‰ o por mil). La proporción isotópica de <sup>2</sup>H y <sup>18</sup>O se calcula de la siguiente manera:

$$\delta^2H \text{ o } \delta^{18}O = \left( \frac{R_{sample}}{R_{St}} - 1 \right) \times 1000 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde  $R_{sample}$  es la relación respectiva de  $^2\text{H}/^1\text{H}$ , o  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , y  $R_{St}$  es la media estándar de agua del océano en Viena (la relación VSMOW absoluta es  $^2\text{H}/^1\text{H} = 155,76 \pm 0,05 \times 10^{-6}$  y  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2005,2 \pm 0,45 \times 10^{-6}$ ).

Todas las muestras recolectadas en la temporada 2022 fueron enviadas y procesadas en el Laboratorio certificado de Isótopos Ambientales (EIL) de la Universidad de Waterloo, Canadá.

#### **2.4. Modelo de mezcla bayesiano MixSIAR**

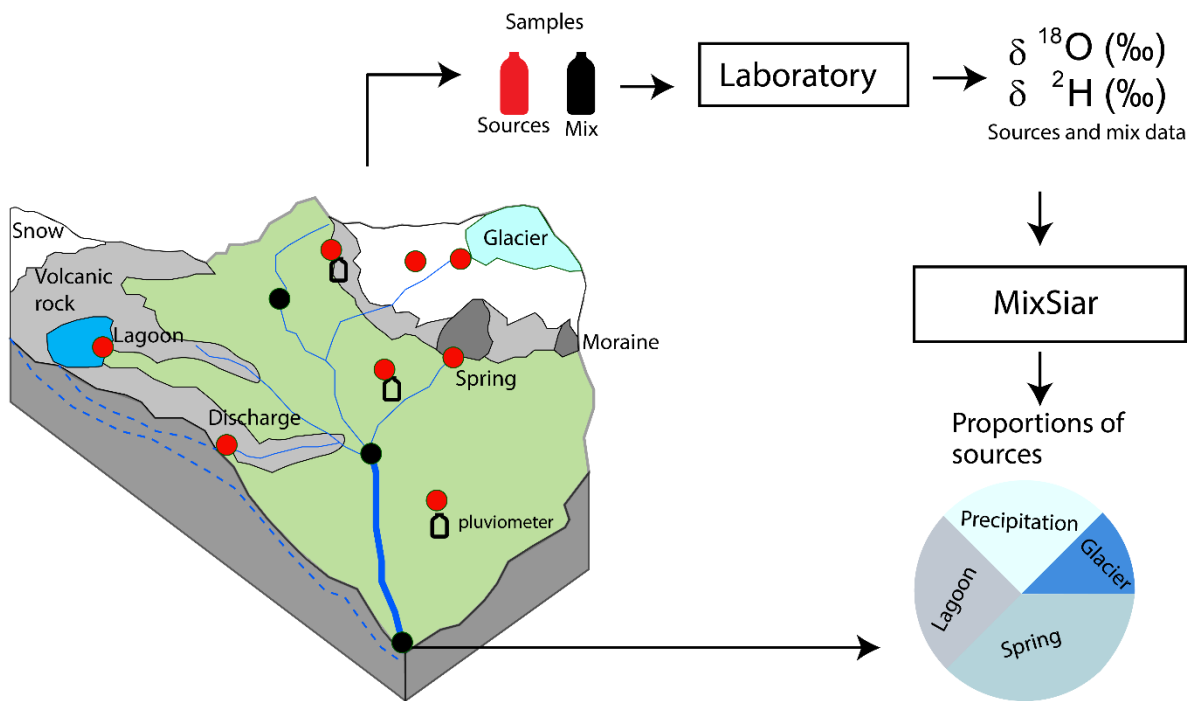
Se seleccionó MixSIAR debido a su enfoque Bayesiano, que ofrece ventajas significativas en el manejo y la interpretación de los datos isotópicos respecto a otros modelos de mezcla lineales (Stock et al., 2018; Stock & Semmens, 2016). Esta metodología Bayesiana nos permite incorporar conocimientos previos y abordar de manera explícita la incertidumbre asociada con los datos isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . MixSIAR generan estimaciones de parámetros que reflejan esta incertidumbre, representada en las distribuciones de probabilidad a posteriori. Además, MixSIAR ofrece una flexibilidad notable en la incorporación de covariables en el análisis. En nuestro estudio, la inclusión de la fecha como covariable es esencial para examinar cómo las contribuciones de las distintas fuentes de agua varían a lo largo del tiempo. Esta capacidad para integrar datos temporales como covariables enriquece nuestra comprensión de las dinámicas hidrológicas de la cuenca.

MixSIAR (Stock et al., 2018; Stock & Semmens, 2016) es un modelo que implementa ecuaciones de mezcla lineales en un marco bayesiano, que permite usar datos de isotopos estables de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  para estimar las proporciones de mezcla de varias fuentes de agua en un sistema hidrológico (Birkel et al., 2021; Fang et al., 2022; Feng et al., 2022; Hathaway et al., 2022; Langs et al., 2020; Marx et al., 2021). A priori, el modelo MixSIAR requiere que los valores de las fuentes sean estadísticamente diferentes entre sí. Los datos de mezcla se cargaron en MixSIAR, con los nombres de los isótopos especificados y la fecha como factor, lo que sugiere un análisis centrado en la variación temporal. Los datos de las fuentes se cargaron utilizando los valores promedio y la desviación estándar de los isótopos para cada fuente. Es decir, en lugar de utilizar un conjunto de datos con múltiples mediciones para cada fuente, está empleando un único valor promedio que representa la firma isotópica de cada fuente. También se cargaron los datos de discriminación, que en este caso fueron cero, lo cual es apropiado para estudios de fuentes de agua donde no se espera fraccionamiento isotópico significativo. Se aplicó el modelo a cada una de las cuatro subcuencas por separado y luego un modelo para la cuenca principal.

En nuestro análisis, aplicamos un enfoque Bayesiano utilizando el modelo MixSIAR, que integra cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) para la inferencia estadística. En todas las ejecuciones del modelo MixSIAR, los parámetros MCMC utilizados para garantizar la convergencia fueron: `chainLength = 300000`, `burn = 200000`, `thin = 100`, `chains = 3`. También se

configuró el modelo para enfocarse en la estructura de error residual, lo que implica que el modelo se centró en la variabilidad en los datos de mezcla que no se puede atribuir a las contribuciones estimadas de las fuentes. MCMC iterativamente predicen las proporciones de cada fuente y buscan los valores que mejor concuerdan con los datos observados. Este proceso utiliza la incertidumbre inherente a los datos y los conocimientos previos para producir distribuciones a posteriori, que representan la densidad de probabilidad de las contribuciones de cada fuente al caudal. Se configuraron varias opciones de salida para generar estadísticas resumidas, gráficos de densidad posterior y diagnósticos de convergencia del modelo. La convergencia del modelo se evaluó a través de los diagnósticos de Gelman-Rubin (diferencia entre cadenas  $<1,05$ ) y Geweke ( $\leq 5\%$  de la puntuación z estándar de cada cadena están fuera de  $\pm 1,96$ ) (Gelman et al., 2014).

La Figura 2 muestra el flujo metodológico utilizado para determinar las fuentes del caudal. Para cada una de las cuencas se utilizaron diferentes fuentes (Tabla 2), por ejemplo, la cuenca A1 las fuentes corresponden a lagos, precipitación y vertientes. Para la cuenca A2 las fuentes corresponden a precipitación y vertientes. Mientras que para las cuencas A3 y A4 las fuentes corresponden a deshielo glaciar, precipitación y vertientes. En el caso de la cuenca mayor A5 se incluyeron todas las fuentes anteriores.



**Figura 2.** Flujo metodológico realizado para determinar las proporciones de las fuentes al caudal. Incluye el muestreo de las fuentes y el caudal, análisis de laboratorio y procesamiento de los datos de isotopos estables en MixSIAR. Las proporciones de las fuentes en el grafico son solo ilustrativas, no corresponden a porcentajes reales obtenidos.

## 2.5. Análisis PCA de las variables físicas de las cuencas

El análisis de componentes principales (PCA por sus iniciales en inglés) permite distinguir las características físicas particulares de las cuencas. Como, pendiente, elevación, densidad de drenaje, litología, cobertura de suelo,

geomorfología, clasificación de suelos y parámetros de área, ancho y longitud de cuenca (Tabla 1).

El PCA es una técnica estadística multivariada para identificar componentes o factores importantes que describen la mayoría de las variaciones en un sistema (Ouyang et al., 2022). PCA transforma un conjunto de datos que contiene  $p$  variables (componentes analíticos), interrelacionadas o correlacionadas en diversos grados, en un nuevo conjunto de datos que contiene  $p$  nuevas variables ortogonales y no correlacionadas llamadas componentes principales (PC). Las PC son funciones lineales de las variables originales de modo que la suma de sus varianzas es igual a la de las variables originales (Olsen et al., 2012). Para los factores originales que afectan la escorrentía, parte de la información contenida en una variable también está contenida en otras variables.

Las variables de pendiente promedio, elevación promedio, aspecto promedio y drenaje se derivaron del DEM SRTM de resolución 30 m (<https://earthexplorer.usgs.gov>). La densidad de drenaje se interpreta como la cantidad de kilómetros de línea de drenaje por kilómetro cuadrado. También utilizamos las fallas activas presente en el área de estudio utilizando la información de Maldonado et al. (2021) para calcular la densidad de fallas en cada una de las cuencas. En cuanto a las unidades litológicas, estas se categorizaron en clases según las unidades presentes en el mapa geológico del

área de estudio (Suárez & Emparan, 1997). Para las diferentes coberturas de suelo se utilizó el catastro de uso de suelo de CIREN (2018). Desarrollamos una clasificación del terreno mediante el cálculo de geomorfones un enfoque de reconocimiento de patrones para la clasificación y el mapeo de accidentes geográficos disponible en SAGA GIS (Jasiewicz & Stepinski, 2013). También utilizamos una clasificación del tipo de suelo según clasificación USDA disponible en OpenLabMaps (Hengl, 2018). Finalmente, los parámetros geométricos de las cuencas se calcularon directamente en QGIS versión 3.22.11.

**Tabla 1.** Variables físicas de las cuencas utilizadas en análisis PCA.

Variables		Cuenca A1	Cuenca A2	Cuenca A3	Cuenca A4	
Pendiente media (°)	AS	18,8	23,9	18,9	22,3	
Elevación media (m)	AE	1353,4	1295,6	1389,9	1360,7	
Aspecto medio	AA	174,7	186,0	175,6	193,6	
Densidad de drenaje	DD	0,001	0,001	0,001	0,001	
Densidad de fallas	FD	0,15	0,14	0,08	0,00	
Litología (%)	Rocas volcánicas y volcanoclásticas	L1	0,0	0,1	0,1	0.0
	Lavas y conos piroclásticos recientes	L2	37,5	0,0	10,1	12.2
	Rocas y depósitos volcánicos y flujos de detritos	L3	12,6	0,6	31,4	35.8
	Rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias	L4	0,1	29,5	25,3	18.7
	Rocas intrusivas	L5	47,2	64,5	21,2	19.9
	Depósitos inconsolidados	L6	2,3	4,0	7,6	7.2
	Depósitos de avalancha	L7	0,3	0,0	0,0	0.0
	Zonas de alteración hidrotermal	L8	0,0	1,3	0,0	0.8
Uso de suelo (%)	Áreas sin vegetación	LC1	29,8	3,5	14,3	24.8
	Bosques	LC2	58,2	71,9	65,6	54.5
	Humedales	LC3	0,0	0,0	0,5	0.0
	Praderas y matorrales	LC4	7,5	24,6	15,2	15.4
	Cuerpos de agua	LC5	3,0	0,0	0,0	0.0
	Glaciares	LC6	1,6	0,0	4,3	5.1
	Glaciaretas	LC7	0,01	0,00	0,05	0.26
Geoformas (%)	Flat	G1	0,0	0,0	0,0	0.0
	Summit	G2	0,9	1,9	2,7	1.9
	Ridge	G3	5,3	8,8	8,6	9.9
	Shoulder	G4	0,1	0,1	0,1	0.0
	Spur	G5	14,8	18,9	17,5	15.5
	Slope	G6	39,9	39,6	41,2	37.0

	Hollow	G7	15,7	14,7	14,2	15.3
	Footslope	G8	0,3	0,1	0,1	0.1
	Valley	G9	18,9	13,9	12,1	17.0
	Depression	G10	4,2	2,0	3,7	3.3
Tipo de suelo (%)	CILo	CILo	0,2	0,0	0,0	0.0
	SaCILo	SaCILo	3,8	3,5	6,2	2.3
	Lo	Lo	14,2	2,9	18,6	10.2
	SaLo	SaLo	81,8	93,6	75,2	87.4
	Área de la cuenca (km2)	AB	359,1	96,9	132,1	103,6
Ancho de cuenca (m)	WB	26013	11326	14155	10022	
Largo de cuenca (m)	LB	27795	12413	15787	19191	

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Caracterización isotópica de las cuencas**

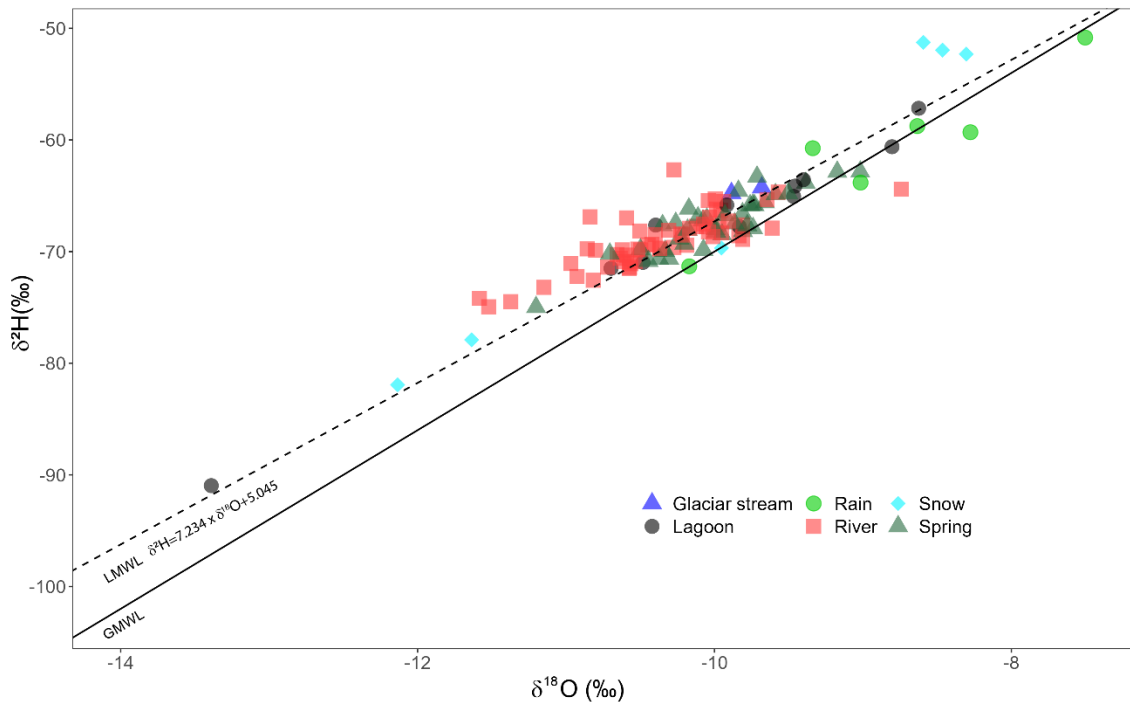
Se estableció una línea meteórica local (LMWL) con los datos de precipitación disponible, esta línea se encuentra por encima de la línea meteórica global (GMWL) y presenta una menor pendiente (Figura 3). Las muestras analizadas se alinean cerca en torno a la LMWL, lo que sugiere una importante influencia de la precipitación en las diferentes fuentes. La precipitación en forma de nieve y lluvia se distribuye en un amplio rango de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . Los manantiales tienden a estar más agrupadas (Figura 3) y no reflejan signos de tiempos de residencia muy largos, pues se encuentran cerca de la LMWL. Por su parte las firmas isotópicas de los lagos también se distribuyen ampliamente alineadas a la LMWL. La Tabla 2 muestra los valores medios y las desviaciones estándar de isótopos estables de cada una de las fuentes utilizadas en los modelos de mezcla para cada subcuenca (A1, A2, A3 y A4) y para la cuenca mayor (A5).

Al mirar los datos en el isoespacio (Figura 4), observamos que la precipitación tiene una desviación estándar muy amplia e incluye las demás fuentes en su firma isotópica. En la cuenca A1 que, en términos de proximidad, los puntos de caudal están relativamente cerca de los centroides de spring y lagoon. En cuanto a varianzas de las firmas isotópicas, aparece una superposición entre las distintas fuentes. La firma isotópica del glaciar muestra una señal isotópica

consistente con una varianza pequeña alrededor del centroide. Los puntos de caudal en la cuenca A3 se distribuyen próximos al centroide de manantiales. en el caso de los valores de las fuentes de la cuenca A4 presentan una distribución similar a los de la cuenca A3. Los puntos de caudal para A4 en general están muy cercanos a la firma de glaciar y manantiales. Cuando se consideran todas las fuentes de las cuencas anidadas para realizar el análisis de la cuenca integrada A5, el gráfico de isoespacio (Figura 4) muestra una interrelación compleja entre las distintas fuentes de agua, la desviación estándar asociada con los manantiales está contenida dentro de la desviación más amplia de las lagunas, sugiriendo que los manantiales pueden también ser recargados por lagunas. Aunque la nieve está más separada de las otras fuentes en términos de su firma isotópica central, su varianza es lo suficientemente amplia como para contener la firma de las lagunas.

**Tabla 2.** Valores isotópicos de las fuentes y número de muestras (*n*) por cuenca. Los valores de las fuentes están representados por la media y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los datos.

<b>Fuente</b>	<b>Media <math>\delta^{18}\text{O}</math> (‰)</b>	<b><math>\sigma</math> <math>\delta^{18}\text{O}</math> (‰)</b>	<b>Media <math>\delta^2\text{H}</math> (‰)</b>	<b><math>\sigma</math> <math>\delta^2\text{H}</math> (‰)</b>	<b>n</b>
<b>Cuenca A1</b>					
Lagunas	-10.04	1.23	-67.74	8.35	11
Precipitación	-9.34	1.34	-62.49	10.21	12
Manantiales	-9.77	0.27	-66.31	1.51	17
<b>Cuenca A2</b>					
Precipitación	-9.34	1.34	-62.49	10.21	12
Manantiales	-10.32	0.01	-70.30	0.35	2
<b>Basin A3</b>					
Glaciar	-9.78	0.10	-64.52	0.25	2
Precipitación	-9.34	1.34	-62.49	10.21	12
Manantiales	-10.24	0.43	-68.76	3.02	9
<b>Cuenca A4</b>					
Glaciar	-9.78	0.10	-64.52	0.25	2
Precipitación	-9.34	1.34	-62.49	10.21	12
Manantiales	-10.22	0.21	-68.22	2.09	7
<b>Basin A5</b>					
Glaciar	-9.78	0.10	-64.52	0.25	2
Lagunas	-10.04	1.23	-67.74	8.35	11
Precipitación	-9.34	1.34	-62.49	10.21	12
Manantiales	-9.99	0.41	-67.44	2.50	37



**Figura 3.** Grafica de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de las distintas fuentes de agua y la escorrentía en la cuenca del río Allipén. La línea negra continua representa la Línea Meteórica Global (GMWL), la línea negra discontinua representa la Línea Meteórica Local (LMWL) ( $R^2 = 0,91$ ). Los símbolos de colores representan las diferentes fuentes.

### 3.2. Variabilidad espacio temporal de las contribuciones de las fuentes al caudal

Para evaluar la importancia relativa de las fuentes al caudal en cada una de estas cuencas, aplicamos el modelo de mezcla MixSiar por separado para 4

cuencas anidadas de la cuenca de cabecera del río Allipén (Figura 5). Adicionalmente, integramos toda la información de las fuentes para estimar la contribución de las fuentes en el outlet del río Allipén (A5).

En la cuenca A1, las lagunas fueron la principal fuente de caudal durante la mayor parte del año, con sus peaks más altos durante los meses de invierno alcanzando hasta un 71% en septiembre 2022. La contribución de las lagunas fue más baja en marzo de 2023, con un 50,2%. Por su parte, la precipitación tuvo su aporte más significativo en marzo de 2023 con un 17,5% y fue la más baja en septiembre de 2022 con un 10,7%. Los manantiales mostraron aportes consistentes, siendo más relevantes en meses de finales de año hidrológico, alcanzando hasta un 32,3% en marzo 2023. En general, las lagunas dominaron el caudal anual, con los manantiales y la precipitación como fuentes secundarias y más variables.

Para la cuenca A2, los manantiales predominaron como la principal fuente de caudal durante todo el periodo de estudio, con aportes más altos en marzo y septiembre de 2023, alcanzando 92,6% y 77,5% respectivamente. La precipitación mostró mayor variabilidad, destacando en agosto de 2022 con un 44,3%. En los meses más secos, como marzo de 2023, la precipitación disminuyó significativamente a 7,4%, mientras que en los meses húmedos aumentó notablemente, reflejando la estacionalidad en la contribución de esta fuente. La dinámica del agua en la cuenca A2 se caracteriza por una fuerte

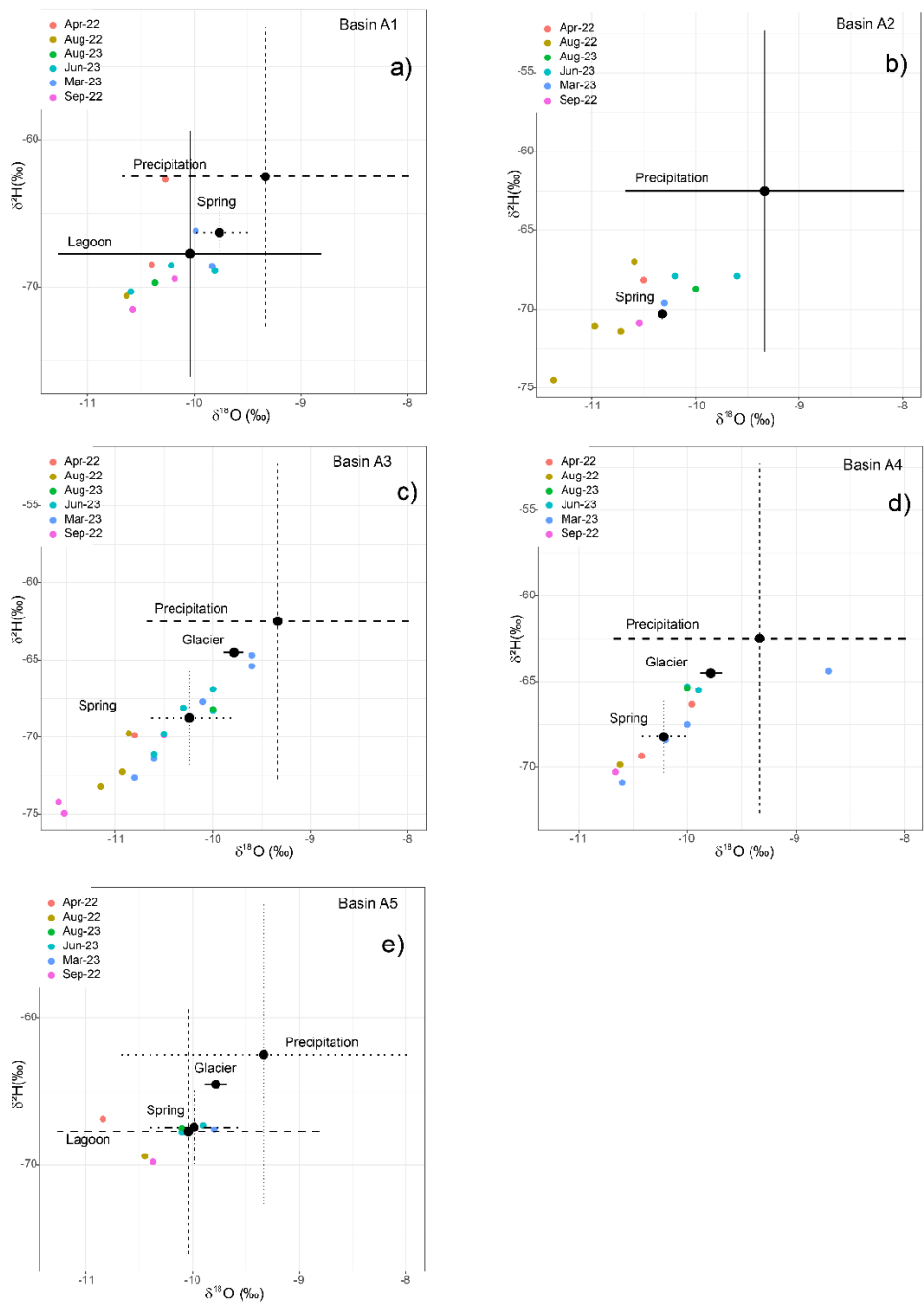
dependencia de los manantiales, complementada por la variabilidad de las precipitaciones a lo largo del año.

En la cuenca A3, los manantiales son la fuente más significativa de caudal, variando menos del 15%, con su mayor aporte en septiembre de 2022 con un 86,4% y el menor en marzo de 2023 con un 77,5%. Los glaciares contribuyen en menor medida que los manantiales, alcanzando hasta 14,9%. La precipitación es la fuente que menos contribuye al caudal, alcanzando en un 11,2% durante agosto de 2023, mostrando una variación del 5,3%. Estos datos indican que los manantiales mantienen un flujo relativamente estable, mientras que los glaciares y la precipitación tienen una contribución más dinámica y estacional en la cuenca A3.

En la cuenca A4, los manantiales presentaron la mayor contribución al caudal con una proporción que varía desde el 51,4% hasta el 64,5%. Siendo menor su aporte en los meses de junio y agosto de 2023. Mientras que el glaciar aportó entre el 20,3% y el 29,9%. La precipitación varía desde 14,6% hasta un máximo de 18,7%. En general se observa que en la cuenca A4 los aportes de glaciar tienen mayor importancia respecto a la cuenca A3.

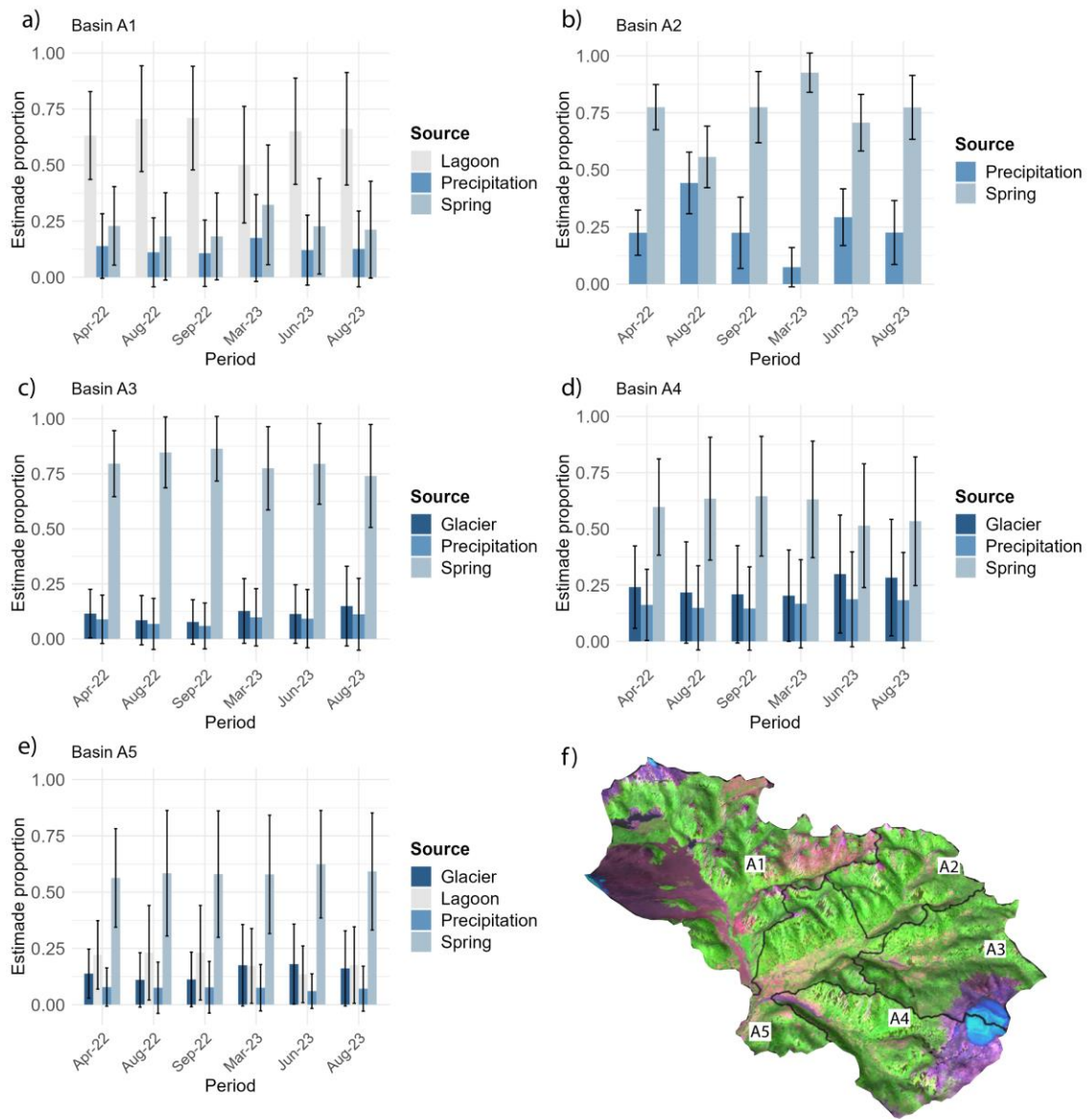
Mientras que en el análisis de la cuenca mayor A5, los manantiales son la principal fuente de caudal durante todo el periodo estudiado, manteniendo una contribución relativamente constante que varía entre 56,3% y 62,4%. Por su parte, las lagunas son la segunda fuente que más contribuye al caudal variando

su aporte entre un 13,5% y 23,1%, en general se observa un mayor aporte de las lagunas durante la temporada 2022. Los glaciares son la tercera fuente de mayor importancia en la cuenca. En general se puede observar que hay una tendencia al aumento del aporte del deshielo glaciar durante la temporada 2023. Presentando el aporte más alto en marzo y junio de 2023 con un 18% y el más bajo en septiembre de 2022 con un 11,2%. La precipitación es la fuente que menos aporta, y su contribución es constante a lo largo del periodo analizado, desde un 6% a un 8%. Según los resultados se observa que la cuenca mayor A5 muestra una dependencia sustancial en los manantiales a lo largo del año, con fluctuaciones estacionales en las contribuciones de glaciares y lagunas y una contribución relativamente estable pero menor de la precipitación.



**Figura 4.** Gráfico de isoespacio que muestra las firmas isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  para distintas fuentes de agua en las cuencas A1, A2, A3, A4 y A5. Los puntos negros representan los centroides que indican la media de las firmas

isotópicas para cada fuente de agua (nieve, glaciar y laguna). Las líneas punteadas y continuas alrededor de cada centroide ilustran la desviación estándar de las mediciones. Los puntos de colores representan la firma isotópica del caudal en los diferentes periodos. Este grafico proporciona una visualización de la dispersión isotópica y la incertidumbre asociada.



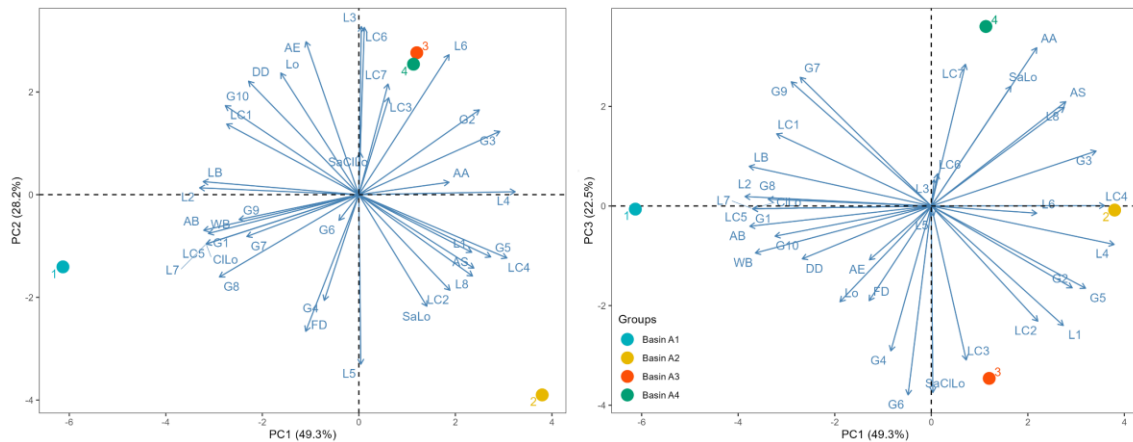
**Figura 5.** Estimación de las proporciones media para cada cuenca anidadas (A1, A2, A3, A4) y para la cuenca del río Allipén integrando todas cuencas menores (A5) en los diferentes periodos de tiempo. La desviación estándar para

cada fuente esta representadas por barras de error. También se muestra un mapa de la ubicación de las cuencas anidadas realizado a partir de una imagen Sentinel en falso color, para resaltar las características topográficas y de cobertura del área de estudio (f).

### **3.3. Análisis PCA de las variables físicas de las cuencas**

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para examinar la relevancia de las variables físicas de las cuencas anidadas, lo que reveló patrones significativos. El primer componente principal (PC1) explica el 49,3% de la varianza total, seguido por PC2 con el 28,2% y PC3 con el 22,5%. Las cuatro cuencas anidadas se dispersaron en diferentes cuadrantes (Figura 6), aunque las cuencas 3 y 4 muestran características similares, agrupándose juntas en el espacio definido por PC1 y PC2. Sin embargo, al analizar la relación entre PC1 y PC3, emergen diferencias notables entre estas cuencas. Aunque comparten valores similares en PC1, se distinguen en PC3, especialmente en variables de uso de suelo y topográficas, resaltando diferencias sutiles pero significativas en estas características. Por otro lado, la cuenca 1 muestra variables relacionadas con la geometría de la cuenca, cuerpos de agua (LC5), depósitos de avalanchas (L7) y aspectos geomorfológicos como áreas planas y áreas de pie de monte (G1 y G8). En contraste, la cuenca 2 difiere en variables asociadas con la pendiente media

(AS), morfologías de tipo espolón (G5), suelos tipo SaLo, cobertura forestal (LC2) y pastizales y matorrales (LC4) además de características vinculadas a litologías volcánicas y volcanoclásticas (L1). Finalmente, las cuencas 3 y 4 están más estrechamente asociadas con litologías de depósitos no consolidados (L6), rocas volcánicas y depósitos y flujos de detritos (L3), cobertura glaciar (LC6) y humedales (LC3). Sin embargo, al incorporar PC3 en el análisis, se revelan diferencias notables en la importancia de las variables entre estas dos cuencas. En la cuenca 3, está relacionado con el uso de suelo de humedales (LC3), mientras que en la cuenca 4, el aspecto de las pendientes (AA) y el uso de suelo glaciar (LC7) son más prominentes, destacando la diversidad en las características topográficas y de uso de suelo entre estas cuencas anidadas.



**Figura 6.** Biplot generado a partir de un análisis de componentes principales (PCA). muestra las puntuaciones de los componentes principales de las cuencas (puntos) y las cargas de las variables (vectores).

## **4. DISCUSIONES**

### **4.1. Variabilidad espacio temporal de la contribución de las fuentes en las cuencas anidadas**

Nuestros análisis revelan una variabilidad estacional y espacial en las contribuciones de las fuentes de agua en las cuencas anidadas de la cuenca del río Allipén. Específicamente, la cuenca A1 demuestra una dependencia significativa y sostenida de las lagunas. Mientras que la cuenca A2 los manantiales son la fuente predominante de agua al caudal. Una tendencia similar se observa en las cuencas A3 y A4, donde los manantiales también constituyen la fuente principal. Esta relevancia de los manantiales sugiere un flujo significativo de aguas subterráneas o subsuperficiales, probablemente impulsado por la infiltración de precipitaciones y el deshielo que se acumula en los acuíferos, emergiendo posteriormente en forma de manantiales. Este patrón concuerda con observaciones en otras regiones glaciadas de los Andes, donde estudios como el de (Baraer et al., 2015) han documentado la importancia crucial de las aguas subterráneas en la alimentación de los caudales fluviales. Además, investigaciones realizadas en diversas áreas montañosas a nivel mundial, tales como los trabajos de Williams et al. (2016) y Chang et al. (2018), también han resaltado este fenómeno, evidenciando una dinámica hidrológica compleja en ambientes montañosos glaciados. La contribución constante de los manantiales puede proporcionar un flujo más estable y menos susceptible a las fluctuaciones estacionales en comparación

con las corrientes superficiales, similar a lo observado en estudios en Chile Central, los Andes centrales de Argentina y los Himalayas (Markovich et al., 2019; Ohlanders et al., 2013; Rodriguez et al., 2016; Williams et al., 2016). Esto subraya la necesidad de considerar las aguas subterráneas como un factor crítico en la gestión de los recursos hídricos en los Andes Húmedos. Sin embargo, se hace necesario entender los tiempos de recarga y tránsito del agua de los manantiales en el área de estudio para poder afirmar que es una fuente menos susceptible a los cambios del clima.

Mientras que en las cuencas glaciizadas A3 y A4 especialmente el rol de los manantiales ha sido significativo. Acá la recarga de agua de los manantiales podría estar asociada no solo a la precipitación, sino que también al deshielo glaciar. Recientemente Lone et al. (2021) muestra que las aguas de deshielo suministran hasta el 83% de la recarga de agua subterránea en una cuenca de montaña ubicada entre las cordilleras de Karakoram y el Himalaya. Esto comprueba que existe una alta transferencia del agua de deshielo hacia los acuíferos de montañas, lo cual ha sido documentado en diferentes cuencas glaciares del mundo (Vincent et al., 2019). En este sentido, es urgente avanzar en comprender el rol del deshielo en las aguas subterráneas en cuencas de montaña de los Andes húmedos. A través de ello, será posible entender el impacto del retroceso de la criosfera a mayores escalas de tiempo. Esto es de gran relevancia porque la evidencia actual permite prever que el cambio climático continuara afectando los patrones de precipitación, acumulación de

nieve y el ritmo del derretimiento glaciar (Araya-Osses et al., 2020; Boisier et al., 2016; Cordero et al., 2019; IPCC, 2021).

En el caso de la cuenca A2 es donde hay una mayor contribución de la precipitación al caudal comparado con las otras cuencas anidadas analizadas. Es de esperar que el aporte de precipitación, tanto de nieve como de lluvia no sea similar en toda la cuenca del río Allipén. Pues, en las cuencas montañosas, la distribución de precipitación, tal como la nieve muestra una enorme heterogeneidad espacial (Kochendorfer et al., 2022) y varía significativamente en cuanto a su espesor y contenido de agua dentro de las cuencas debido a las diferentes configuraciones topográficas, la cubierta de suelo y las condiciones meteorológicas locales (Elder et al., 1991; Erxleben et al., 2002; Fayad et al., 2017).

En general, cuando se analiza la cuenca integrando los datos de las cuencas anidadas (A5) la contribución significativa de los manantiales en la cuenca del río Allipén, pueden compararse con los hallazgos de estudios en otras regiones montañosas. Por ejemplo, al igual que en las cuencas glaciares de la Cordillera Blanca en Perú y en la meseta tibetana, los resultados sugieren que las aguas subterráneas son contribuyentes importantes en la cuenca, especialmente durante la estación seca (Baraer et al., 2015; Pu et al., 2017; Zhou et al., 2021).

#### **4.2. Relación entre características físicas involucradas en generación de escorrentía y contribuciones de fuentes al caudal**

Los valores de observación en los tres primeros componentes principales permiten comparar y clasificar las cuencas (Figura 6). La agrupación de las cuencas en el espacio de componentes principales es un hallazgo interesante, pues se pueden observar diferencias claves y similitudes en las cuencas anidadas. En este sentido, la identificación de variables clave en cada cuenca basada en las cargas en los componentes principales ofrece una comprensión más específica de los factores que pueden influir en la generación de escorrentía.

En cuenca 1 hay importancia de las lagunas en la escorrentía que funcionan como áreas de almacenamiento lo cual también se asocia a la importancia de morfologías planas en esta cuenca. La unidad de lavas recientes tiene gran influencia en el funcionamiento hidrológico del área, algunas de los manantiales muestreadas surgen desde las lavas del volcán Llaima, sugiriendo que esta configuración geológica puede cumplir la función de retardar la entrega de agua al caudal. Esto es complementario con lo observado en el modelo de mezcla donde los manantiales tienen un rol relevante en la generación de caudal, reforzando la idea de que el paisaje volcánico del lugar es esencial para una infiltración eficiente tanto de la precipitación, como desde las lagunas para facilitar el flujo de agua. Nuestros resultados son concordantes con investigaciones realizadas en contextos tectónicos similares. Por ejemplo, al

norte de nuestra región de estudio, en el área del volcán nevados de Chillán, se encontró que las características geológicas favorecen la infiltración y los movimientos de las aguas subterráneas (Muñoz et al., 2016). De igual forma, Tague & Grant (2004) encontraron un rol dominante de litología volcánica altamente permeable sobre el régimen de flujo en Oregón. Por otra parte, si bien la densidad de fallas activas no se observó como una variable estadísticamente importante, el área se emplaza sobre un importante sistema de fallas (Pérez-Flores et al., 2016), lo cual es indicativo de basamento fracturado con importantes implicancias hidrológicas (Daniele et al., 2020). Por ejemplo, al norte de nuestra zona de estudio se reconoce que suelos arenosos sobre un basamento de roca fracturada favorece la infiltración de lluvia y deshielo por sobre la escorrentía superficial (Arumí et al., 2019). En este sentido sería adecuado complementar las observaciones de este estudio con análisis geoquímicos para ampliar la comprensión del sistema hidrológico y los procesos predominantes.

En la cuenca 2 los procesos de generación de escorrentía pueden asociarse con la topografía de la cuenca (mayor altura y pendiente media que las otras cuencas) esto podría relacionarse con una mayor influencia de la precipitación en forma de nieve en el caudal (comparado con las otras cuencas), ya que la mayor altura puede llevar a una mayor acumulación de nieve en invierno. Además, la mayor cobertura de bosques y la presencia de litologías volcánicas

pueden influir en la infiltración de agua y en la entrega gradual de agua al caudal (Post & Jones, 2021).

Las cuencas 3 y 4 muestran similitudes en PC1 vs PC2, lo que sugiere que comparten características en estas dos dimensiones. Sin embargo, la diferenciación en PC3 indica que las diferencias clave entre estas cuencas se relacionan con variables topográficas y de uso del suelo. A pesar de las diferencias observadas, las cuencas 3 y 4 tienen una influencia parecida de las variables físicas involucradas en la generación de escorrentía. En estas cuencas, las coberturas de mayor significancia estadística, corresponden a glaciario, así como la presencia de depósitos no-consolidados (L6) y de la unidad compuesta por rocas y depósitos volcánicos y flujos de detritos (L3), precisamente en esta última unidad hemos podido observar surgencias de agua que han sido clasificadas como manantiales. Esto puede indicar que la combinación de la cobertura glaciario y las litologías volcánicas crea condiciones propicias para la generación de escorrentía en estas cuencas. Mientras que la presencia de glaciares y el aspecto característico medio de la cuenca 4 refleja diferencias clave en los procesos de generación de escorrentía en comparación con la cuenca 3.

En general las litologías volcánicas y depósitos son muy importantes en procesos de generación de escorrentía en el área, con cargas significativas en PC1. Por ejemplo, la gran importancia de los manantiales podría estar

estrechamente asociada a la configuración geológica del área, como se ha podido observar en otros estratovolcanes (Miller et al., 2021). En algunas cuencas de montaña la descarga de agua subterránea tiene mayor importancia que el deshielo nival y aporte de glaciares (Guo et al., 2022). Recientemente se ha concluido que cuencas con abundantes depósitos cuaternarios pueden entregar más agua durante periodo de caudal bajo (Arnoux et al., 2020). Sin duda, la composición litológica afecta la permeabilidad del suelo, la capacidad de retención de agua y, en última instancia, la cantidad y el flujo de agua en las cuencas (Andermann et al., 2012; Birkel et al., 2014; Hale & McDonnell, 2016; Pfister et al., 2017; Uchida et al., 2008). Por otro lado, el análisis muestra que las variables relacionadas con la cobertura vegetal, como LC2 (Bosques) y LC4 (Praderas y matorrales), tienen cargas significativas en PC2. Esto indica que la presencia y el tipo de vegetación también son factores importantes en la generación de escorrentía del área de estudio. El estudio de (Fujino et al., 2023) destaca el papel crucial de la vegetación alpina en la hidrología de las montañas. Se ha encontrado que la vegetación alpina no solo mejora la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos de estas zonas, sino que también retrasa la descarga de agua de precipitación. Nuestros resultados sugieren que la variabilidad geomorfológica de la cuenca es una condición física elemental que influye en la generación de escorrentía, la distribución espacial de la escorrentía y la interacción entre el agua superficial y subterránea.

### **4.3. Implicancias del deshielo glaciar en la hidrología de cabeceras de cuencas de los Andes Húmedos**

Este estudio representa uno de los esfuerzos pioneros en los Andes Húmedos para dilucidar el papel de los glaciares en la dinámica del caudal de los ríos. En particular, nos enfocamos en la cuenca superior del río Allipén, que recibe aguas provenientes del glaciar Sollipulli, ubicado en la caldera del volcán homónimo. Nuestros análisis revelan un rol significativo del glaciar. En la cuenca A4 que cuenta con una cobertura glaciar de 5,1%, observamos una mayor dependencia del deshielo glaciar, con contribuciones estables alrededor del 25% durante todo el año, alcanzando un máximo de 30%. Para la cuenca mayor A5, que integra las subcuencas analizadas, el glaciar Sollipulli, a pesar de cubrir solo un 1,5% de la cuenca total, es la tercera fuente que más contribuye al caudal, alcanzando una contribución de un 18% en marzo y junio de 2023. Estos hallazgos resaltan el rol crucial del deshielo glaciar como una fuente estacional y dinámica para el caudal en regiones montañosas, especialmente en aquellas con glaciares situados en centros volcánicos. Nuestros resultados indican que, en la cuenca del río Allipén, el deshielo glaciar del glaciar Sollipulli contribuye significativamente al caudal. En este sentido, creemos que el retroceso de los glaciares documentado en la región (Dussailant et al., 2019), representa un patrón complejo en la comprensión del comportamiento hidrológico de las cuencas de montaña en el futuro, los escenarios de cambio climático proyectados (IPCC, 2021). Estos hallazgos, nos

lleva a considerar la importancia de prever cómo evolucionará la escorrentía relacionada con el deshielo del glaciar Sollipulli en el futuro. Investigaciones desarrolladas en cuencas de montaña alrededor del mundo (Immerzeel et al., 2013; Huss et al., 2014), han demostrado que, inicialmente el retroceso glaciar incrementa la escorrentía fluvial, impulsada por un aumento en el aporte de agua de deshielo. Sin embargo, este incremento de la escorrentía solo continúa hasta alcanzar un punto máximo, tras el cual empieza a disminuir (Huss & Hock, 2018). Modelos de escenarios futuros, como los presentados por Ragetti et al. (2016) y Huss & Hock (2018), sugieren que, en cuencas Andinas al norte de nuestra área de estudio, el caudal disminuirá como resultado de este retroceso glaciar. Estos descubrimientos resaltan la necesidad urgente de investigar más a fondo el impacto del cambio climático en la dinámica hidrológica en cuencas de los Andes y su influencia en la disponibilidad de recursos hídricos en la región.

#### **4.4. Limitaciones, recomendaciones e implicancias del estudio**

Si bien las métricas de convergencia del modelo de mezcla se ajustan a lo esperado (Stock et al., 2018), la densidad de datos analizados en MixSiar puede ser baja, debido a limitaciones para acceder a sitios de muestreo. Recomendamos en un futuro, extender la frecuencia espaciotemporal del análisis, una mayor densificación del muestreo isotópico permitirá robustecer el análisis estadístico. Por otro lado, la superposición de las varianzas en las

firmas isotópicas de algunos miembros finales (Figura 4) significa que existe una incertidumbre significativa en la contribución exacta de cada fuente, lo que podría deberse a la influencia de procesos hidrológicos. Por otra parte, debido a los mecanismos de muestreo superficial empleado en los lagos, creemos que la firma isotópica de estos puede estar subrepresentada, dado los procesos de estratificación en profundidad que tienen la capacidad de generar variabilidad en su composición isotópica (Sepúlveda et al., 2022).

Además, es importante subrayar que las contribuciones de las distintas fuentes de agua identificadas en este estudio están sujetas a variaciones temporales interanuales, las cuales pueden ser más pronunciadas en años caracterizados por condiciones climáticas extremas, ya sea de sequía o de alta pluviosidad. Estas fluctuaciones se deben a la influencia directa que ejerce el clima en la sobre los procesos hidrológicos de las cuencas. En un contexto de cambio climático, se anticipa que estos procesos hidrológicos, y por ende, las contribuciones de las diversas fuentes al flujo superficial, adquieran un carácter no estacionario. De hecho, estudios recientes mediante simulaciones numéricas han revelado la posibilidad de cambios significativos en los componentes del flujo superficial bajo diversos escenarios de cambio climático (Xiang et al., 2022). Asimismo, modificaciones en el uso o en la cobertura del suelo, como variaciones en la extensión de la cubierta forestal, tienen el potencial de alterar futuramente las contribuciones de las fuentes estimadas, impactando no solo en

el volumen total de escorrentía de una cuenca sino también en la distribución de sus componentes (Ding et al., 2022).

Respecto a la implicancia del estudio, los resultados presentados ayudan mejorar la comprensión del sistema hidrológico en cuencas de cabecera de los Andes Húmedos. Además, permitirán identificar nuevos puntos y técnicas de monitoreo para discriminar y cuantificar el aporte de las diferentes fuentes y la identificación de zonas o procesos hidrológicos relevantes en términos de conservación o manejo integrado.

## 5. CONCLUSIONES

Nuestra investigación ha revelado una variabilidad estacional y espacial en las fuentes de agua dentro de las cuencas anidadas de la cuenca del río Allipén. El análisis de cuencas anidadas destacó la importancia de los manantiales como principal fuente en 3 de las 4 cuencas analizadas (A2, A3 y A4). Mientras que las lagunas destacaron como fuente principal en la cuenca A1, donde su influencia es predominante durante toda la temporada. En las cuencas glaciadas A3 y A4 el deshielo glaciar es la segunda fuente más importante. Sin embargo, en la cuenca A4, se observó una mayor dependencia del deshielo glaciar respecto de la cuenca A3. Los resultados indican que en la cuenca A4 hay una dinámica hidrológica compleja en la que las aguas subterráneas y el deshielo juegan un papel crucial.

El análisis del outlet de la cuenca mayor A5 destacó la predominancia de los manantiales a lo largo del año, con variaciones estacionales menos pronunciadas entre un 56% y un 62.4%. Las lagunas siguieron en importancia con un aporte que varió entre el 13.5% y el 23.1%. Mientras que el deshielo del glaciar Sollipulli aporta entre un 11% y un 18%, a pesar de cubrir solo un 1.5% de la superficie de toda la cuenca. La precipitación fue la menos variable y la de menor contribución.

Nuestros resultados resaltan la importancia de los manantiales como fuente de agua al caudal de las cuencas montañosas de los Andes Húmedos, siendo comparable con lo observado en otras regiones montañosas del mundo.

La configuración física de la cuenca, especialmente su naturaleza volcánica, juega un papel crucial en la hidrología de la cuenca del río Allipén. La presencia de formaciones volcánicas influye significativamente en el flujo hídrico, facilita una infiltración eficiente y retarda la entrega de agua al caudal. Este aspecto es reforzado por las surgencias de agua desde estas formaciones, sugiriendo que la geología volcánica cumple un rol esencial en la regulación y distribución del agua en la cuenca.

La densidad de datos en el análisis fue limitada por restricciones de acceso a los sitios de muestreo. Se recomienda ampliar el análisis temporal para captar mejor las variaciones espaciotemporales.

Finalmente, nuestros hallazgos subrayan la importancia de los manantiales y el deshielo glaciar en la hidrología de las cuencas de montaña, especialmente en los Andes Húmedos, y ponen de relieve los desafíos que el cambio climático plantea para la gestión sostenible de los recursos hídricos en estas regiones críticas.

## 6. REFERENCIAS

- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, *54*(9–10), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>
- Armstrong, R. L., Rittger, K., Brodzik, M. J., Racoviteanu, A., Barrett, A. P., Khalsa, S. J. S., Raup, B., Hill, A. F., Khan, A. L., Wilson, A. M., Kayastha, R. B., Fetterer, F., & Armstrong, B. (2019). Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: separating melt water sources in river flow. *Regional Environmental Change*, *19*(5), 1249–1261. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1429-0>
- Baraer, M., Mckenzie, J., Mark, B. G., Gordon, R., Bury, J., Condom, T., Gomez, J., Knox, S., & Fortner, S. K. (2015). Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: A multi-site study in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, *29*(11), 2561–2581. <https://doi.org/10.1002/hyp.10386>
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, *58*(75), 166–180. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>
- Birkel, C., Correa Barahona, A., Duvert, C., Granados Bolaños, S., Chavarría Palma, A., Durán Quesada, A. M., Sánchez Murillo, R., & Biester, H. (2021). End member and Bayesian mixing models consistently indicate near-surface flowpath dominance in a pristine humid tropical rainforest. *Hydrological Processes*, *35*(4). <https://doi.org/10.1002/hyp.14153>
- Björn Rodriguez, N., Pfister, L., Zehe, E., & Klaus, J. (2021). A comparison of catchment travel times and storage deduced from deuterium and tritium tracers using StorAge Selection functions. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(1), 401–428. <https://doi.org/10.5194/hess-25-401-2021>
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, *43*(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Bowen, G. J., Cai, Z., Fiorella, R. P., & Putman, A. L. (2019). Isotopes in the Water Cycle: Regional-to Global-Scale Patterns and Applications. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences Is Online at Earth.Annualreviews.Org*, *47*, 453–479. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018>
- Bravo, C., Loriaux, T., Rivera, A., & Brock, B. W. (2017). Assessing glacier melt contribution to streamflow at Universidad Glacier, central Andes of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(7), 3249–3266. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3249-2017>

- Carretero, S., Rodrigues Capítulo, L., Dapeña, C., Fabiano, M., & Kruse, E. (2022). A chemical and isotopic approach to investigate groundwater dynamics in a coastal aquifer. *Catena*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106229>
- Chang, Q., Ma, R., Sun, Z., Zhou, A., Hu, Y., & Liu, Y. (2018). Using Isotopic and Geochemical Tracers to Determine the Contribution of Glacier-Snow Meltwater to Streamflow in a Partly Glacierized Alpine-Gorge Catchment in Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(18), 10,037-10,056. <https://doi.org/10.1029/2018JD028683>
- Chen, H., Chen, Y., Li, W., & Li, Z. (2019). Quantifying the contributions of snow/glacier meltwater to river runoff in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 174, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.002>
- Chen, X., Wang, G., & Wang, F. (2018). Classification of stable isotopes and identification of water replenishment in the Naqu River Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Water (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010046>
- Chen, Y., Li, W., Fang, G., & Li, Z. (2017). Review article: Hydrological modeling in glacierized catchments of central Asia-status and challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 669–684. <https://doi.org/10.5194/hess-21-669-2017>
- CIREN. (2018). *REGIÓN DE LA ARAUCANÍA, PROVINCIA DE CAUTÍN COMUNA MELIPEUCO RECURSOS NATURALES*.
- Cordero, R. R., Asencio, V., Feron, S., Damiani, A., Llanillo, P. J., Sepulveda, E., Jorquera, J., Carrasco, J., & Casassa, G. (2019). Dry-Season Snow Cover Losses in the Andes (18°–40°S) driven by Changes in Large-Scale Climate Modes. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53486-7>
- Correa, A., Windhorst, D., Tetzlaff, D., Crespo, P., Célleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2017). Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo. *Water Resources Research*, 53(7), 5998–6017. <https://doi.org/10.1002/2016WR020187>
- Cowie, R. M., Knowles, J. F., Dailey, K. R., Williams, M. W., Mills, T. J., & Molotch, N. P. (2017). Sources of streamflow along a headwater catchment elevational gradient. *Journal of Hydrology*, 549, 163–178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.044>
- Crespo, S. A., Lavergne, C., Fernandoy, F., Muñoz, A. A., Cara, L., & Olfos-Vargas, S. (2020). Where does the Chilean Aconcagua river come from? Use of natural tracers for water genesis characterization in glacial and periglacial environments. *Water (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092630>
- Crespo, S., Aranibar, J., Gomez, L., Schwikowski, M., Bruetsch, S., Cara, L., & Villalba, R. (2017). Ionic and stable isotope chemistry as indicators of water sources to the Upper Mendoza

- River basin, Central Andes of Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 62(4), 588–605. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1252840>
- Ding, B., Zhang, Y., Yu, X., Jia, G., Wang, Y., Wang, Y., Zheng, P., & Li, Z. (2022). Effects of forest cover type and ratio changes on runoff and its components. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 445–456. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.01.006>
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802–808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Dwivedi, R., Eastoe, C., Knowles, J. F., Wright, W. E., Hamann, L., Minor, R., Mitra, B., Meixner, T., McIntosh, J., Ty Ferre, P. A., Castro, C., Niu, G. Y., Barron-Gafford, G. A., Abramson, N., Papuga, S. A., Stanley, M., Hu, J., & Chorover, J. (2020). Vegetation source water identification using isotopic and hydrometric observations from a subhumid mountain catchment. *Ecohydrology*, 13(1). <https://doi.org/10.1002/eco.2167>
- Eastoe, C. J., & Wright, W. E. (2019). Hydrology of mountain blocks in Arizona and New Mexico as revealed by isotopes in groundwater and precipitation. *Geosciences (Switzerland)*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/geosciences9110461>
- Fang, J., Yi, P., Stockinger, M., Xiong, L., & Shen, J. (2022). Investigation of factors controlling the runoff generation mechanism using isotope tracing in large-scale nested basins. *Journal of Hydrology*, 615. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128728>
- Farías-Barahona, D., Vivero, S., Casassa, G., Schaefer, M., Burger, F., Seehaus, T., Iribarren-Anacona, P., Escobar, F., & Braun, M. H. (2019). Geodetic mass balances and area changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote Sensing*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/rs11030260>
- Feng, M., Zhang, W., Zhang, S., Sun, Z., Li, Y., Huang, Y., Wang, W., Qi, P., Zou, Y., & Jiang, M. (2022). The role of snowmelt discharge to runoff of an alpine watershed: Evidence from water stable isotopes. *Journal of Hydrology*, 604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127209>
- Fernández-Alberti, S., Abarca-del-Río, R., Bornhardt, C., & Ávila, A. (2021). Development and Validation of a Model to Evaluate the Water Resources of a Natural Protected Area as a Provider of Ecosystem Services in a Mountain Basin in Southern Chile. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.539905>
- Finger, D., Vis, M., Huss, M., & Seibert, J. (2015). The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments. *Water Resources Research*, 51(4), 1939–1958. <https://doi.org/10.1002/2014WR015712>

- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, *40*(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gascoïn, S., Lhermitte, S., Kinnard, C., Bortels, K., & Liston, G. E. (2013). Wind effects on snow cover in Pascua-Lama, Dry Andes of Chile. *Advances in Water Resources*, *55*, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.11.013>
- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., & Rubin, D. B. (2014). *Bayesian data analysis (Vol. 2)*. Taylor & Francis Boca Raton.
- Hathaway, J. M., Westbrook, C. J., Rooney, R. C., Petrone, R. M., & Langs, L. E. (2022). Quantifying relative contributions of source waters from a subalpine wetland to downstream water bodies. *Hydrological Processes*, *36*(9). <https://doi.org/10.1002/hyp.14679>
- He, Z. H., Tian, F. Q., Gupta, H. V., Hu, H. C., & Hu, H. P. (2015). Diagnostic calibration of a hydrological model in a mountain area by hydrograph partitioning. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(4), 1807–1826. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1807-2015>
- He, Z., Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Weise, S. M., Kalashnikova, O., Gafurov, A., Duethmann, D., Barandun, M., & Merz, B. (2019). Constraining hydrological model parameters using water isotopic compositions in a glacierized basin, Central Asia. *Journal of Hydrology*, *571*, 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.048>
- Hokanson, K. J., Rostron, B. J., Devito, K. J., Hopkinson, C., & Mendoza, C. A. (2022). Landscape controls of surface-water/groundwater interactions on shallow outwash lakes: how the long-term groundwater signal overrides interannual variability due to evaporative effects. *Hydrogeology Journal*, *30*(1), 251–264. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02422-z>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, *8*(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jasechko, S., Kirchner, J. W., Welker, J. M., & McDonnell, J. J. (2016). Substantial proportion of global streamflow less than three months old. *Nature Geoscience*, *9*(2), 126–129. <https://doi.org/10.1038/ngeo2636>
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, *182*, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>

- Junghans, N., Cullmann, J., & Huss, M. (2011). Evaluating the effect of snow and ice melt in an Alpine headwater catchment and further downstream in the River Rhine. *Hydrological Sciences Journal*, 56(6), 981–993. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.595372>
- Kaser, G., Großhauser, M., & Marzeion, B. (2010). 1008162107 PNAS. 107(47), 20223–20227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008162107/-/DCSupplemental>
- Lachowycz, S. M., Pyle, D. M., Gilbert, J. S., Mather, T. A., Mee, K., Naranjo, J. A., & Hobbs, L. K. (2015). Glaciovolcanism at Volcán Sollipulli, southern Chile: Lithofacies analysis and interpretation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 303, 59–78. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.06.021>
- Langs, L. E., Petrone, R. M., & Pomeroy, J. W. (2020). A  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  stable water isotope analysis of subalpine forest water sources under seasonal and hydrological stress in the Canadian Rocky Mountains. *Hydrological Processes*, 34(26), 5642–5658. <https://doi.org/10.1002/hyp.13986>
- Li, D., Wrzesien, M. L., Durand, M., Adam, J., & Lettenmaier, D. P. (2017). How much runoff originates as snow in the western United States, and how will that change in the future? *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6163–6172. <https://doi.org/10.1002/2017GL073551>
- Livneh, B., & Badger, A. M. (2020). Drought less predictable under declining future snowpack. *Nature Climate Change*, 10(5), 452–458. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0754-8>
- Maldonado, V., Contreras, M., & Melnick, D. (2021). A comprehensive database of active and potentially-active continental faults in Chile at 1:25,000 scale. *Scientific Data*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00802-4>
- Markovich, K. H., Dahlke, H. E., Arumí, J. L., Maxwell, R. M., & Fogg, G. E. (2019). Bayesian hydrograph separation in a minimally gauged alpine volcanic watershed in central Chile. *Journal of Hydrology*, 575, 1288–1300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.014>
- Marx, C., Tetzlaff, D., Hinkelmann, R., & Soulsby, C. (2021). Isotope hydrology and water sources in a heavily urbanized stream. *Hydrological Processes*, 35(10). <https://doi.org/10.1002/hyp.14377>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- McGuire, K., & McDonnell, J. (2006). Stable Isotope Tracers in Watershed Hydrology. In *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* (pp. 334–374). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470691854.ch11>

- Nan, Y., Tian, F., Hu, H., Wang, L., & Zhao, S. (2019). Stable isotope composition of river waters across the world. *Water (Switzerland)*, *11*(9). <https://doi.org/10.3390/w11091760>
- Nesterova, N., Makarieva, O., & Post, D. A. (2021). Parameterizing a hydrological model using a short-term observational dataset to study runoff generation processes and reproduce recent trends in streamflow at a remote mountainous permafrost basin. *Hydrological Processes*, *35*(7). <https://doi.org/10.1002/hyp.14278>
- Ohlanders, N., Rodriguez, M., & McPhee, J. (2013). Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(3), 1035–1050. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1035-2013>
- Olsen, R. L., Chappell, R. W., & Loftis, J. C. (2012). Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis - literature review and Illinois River watershed case study. *Water Research*, *46*(9), 3110–3122. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.028>
- Ortega, L., & Gil, L. (2019). *But what are isotopes? Isotope hydrology: an overview.*
- Ouyang, Y., Grace, J. M., Parajuli, P. B., & Caldwell, P. V. (2022). Impacts of Multiple Hurricanes and Tropical Storms on Watershed Hydrological Processes in the Florida Panhandle. *Climate*, *10*(3). <https://doi.org/10.3390/cli10030042>
- Penna, D., & van Meerveld, H. J. (2019). Spatial variability in the isotopic composition of water in small catchments and its effect on hydrograph separation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *6*(5), 1–33. <https://doi.org/10.1002/wat2.1367>
- Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Veloso, E., Arancibia, G., & Roquer, T. (2016). Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe-Ofqui fault System, Chile. *Tectonophysics*, *680*, 192–210. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.016>
- Petermann, E., Gibson, J. J., Knöller, K., Pannier, T., Weiß, H., & Schubert, M. (2018). Determination of groundwater discharge rates and water residence time of groundwater-fed lakes by stable isotopes of water ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) and radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) mass balances. *Hydrological Processes*, *32*(6), 805–816. <https://doi.org/10.1002/hyp.11456>
- Peters, E., Visser, A., Esser, B. K., & Moran, J. E. (2018). Tracers reveal recharge elevations, groundwater flow paths and travel times on Mount Shasta, California. *Water (Switzerland)*, *10*(2). <https://doi.org/10.3390/W10020097>
- Pu, T., Qin, D., Kang, S., Niu, H. W., He, Y., & Wang, S. (2017). Water isotopes and hydrograph separation in different glacial catchments in the southeast margin of the Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, *31*(22), 3810–3826. <https://doi.org/10.1002/hyp.11293>

- Reato, A., Borzi, G., Martínez, O. A., & Carol, E. (2022). Role of rock glaciers and other high-altitude depositional units in the hydrology of the mountain watersheds of the Northern Patagonian Andes. *Science of the Total Environment*, 824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153968>
- Rodriguez, M., Ohlanders, N., Pellicciotti, F., Williams, M. W., & McPhee, J. (2016). Estimating runoff from a glacierized catchment using natural tracers in the semi-arid Andes cordillera. *Hydrological Processes*, 30(20), 3609–3626. <https://doi.org/10.1002/hyp.10973>
- Rubio-Álvarez, E., & McPhee, J. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952-2003. *Water Resources Research*, 46(5). <https://doi.org/10.1029/2009WR007982>
- Saberi, L., McLaughlin, R. T., Crystal Ng, G. H., La Frenierre, J., Wickert, A. D., Baraer, M., Zhi, W., Li, L., & Mark, B. G. (2019). Multi-scale temporal variability in meltwater contributions in a tropical glacierized watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 405–425. <https://doi.org/10.5194/hess-23-405-2019>
- Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E., & Valois, R. (2019). Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. In *Regional Environmental Change* (Vol. 19, Issue 5, pp. 1263–1279). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3>
- Scheihing, K. W., Moya, C. E., Struck, U., Lictevout, E., & Tröger, U. (2018). Reassessing hydrological processes that control stable Isotope Tracers in groundwater of the Atacama Desert (Northern Chile). *Hydrology*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology5010003>
- Sepúlveda, L. D., Echevoyen, C. V., Martin, M. E., Campodonico, V. A., Pasquini, A. I., Temporetti, P., & Lecomte, K. L. (2022). Isotopic signature of a glacial influenced hydrological system in northern Patagonia, Argentina. *Hydrological Processes*, 36(2). <https://doi.org/10.1002/hyp.14504>
- Somers, L. D., & McKenzie, J. M. (2020). A review of groundwater in high mountain environments. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* (Vol. 7, Issue 6). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/wat2.1475>
- 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*, 2018(6). <https://doi.org/10.7717/peerj.5096>
- Stock, B., & Semmens, B. (2016). *MixSIAR GUI User Manual v3.1*.
- Suárez, M., & Emparan C. (1997). Hoja Curacautín, Regiones de la Araucanía y del Biobío, mapa escala 1:250.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería*.

- Sucozhañay, A., & Célleri, R. (2018). Impact of Rain Gauges distribution on the runoff simulation of a small mountain catchment in Southern Ecuador. *Water (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/w10091169>
- Tomislav Hengl. (2018). *Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m (v0.2) [Data set]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2525817>.
- van Tiel, M., Stahl, K., Freudiger, D., & Seibert, J. (2020). Glacio-hydrological model calibration and evaluation. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* (Vol. 7, Issue 6). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/wat2.1483>
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>
- von Freyberg, J., Rücker, A., Zappa, M., Schlumpf, A., Studer, B., & Kirchner, J. W. (2022). Four years of daily stable water isotope data in stream water and precipitation from three Swiss catchments. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01148-1>
- W. Kirchner, J., & T. Allen, S. (2020). Seasonal partitioning of precipitation between streamflow and evapotranspiration, inferred from end-member splitting analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 17–39. <https://doi.org/10.5194/hess-24-17-2020>
- Wan, C., Li, K., Zhang, H., Yu, Z., Yi, P., & Chen, C. (2020). Integrating isotope mass balance and water residence time dating: insights of runoff generation in small permafrost watersheds from stable and radioactive isotopes. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 326(1), 241–254. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07315-1>
- Wang, X., Yang, T., Xu, C. Y., Yong, B., & Shi, P. (2019). Understanding the discharge regime of a glacierized alpine catchment in the Tianshan Mountains using an improved HBV-D hydrological model. *Global and Planetary Change*, 172, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.09.017>
- Williams, M. W., Wilson, A., Tshering, D., Thapa, P., & Kayastha, R. B. (2016). Using geochemical and isotopic chemistry to evaluate glacier melt contributions to the Chamkar Chhu (river), Bhutan. *Annals of Glaciology*, 57(71), 339–348. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A068>
- Xiang, X., Ao, T., & Xiao, Q. (2022). Variation of Runoff and Runoff Components of the Lhasa River Basin in the Qinghai-Tibet Plateau under Climate Change. *Atmosphere*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/atmos13111848>
- Yang, N., Zhou, P., Wang, G., Zhang, B., Shi, Z., Liao, F., Li, B., Chen, X., Guo, L., Dang, X., & Gu, X. (2021). Hydrochemical and isotopic interpretation of interactions between surface water and groundwater in Delingha, Northwest China. *Journal of Hydrology*, 598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126243>

Zhang, F., Jia, W., Zhu, G., Zhang, Z., Shi, Y., Yang, L., Xiong, H., & Zhang, M. (2022). Using stable isotopes to investigate differences of plant water sources in subalpine habitats. *Hydrological Processes*, 36(2). <https://doi.org/10.1002/hyp.14518>