

BOLETÍN DE ESTUDIOS GEOGRÁFICOS



E-ISSN 2525-1813

ISSN 0374-6186

N° 116 - NOV 2021 - ABR 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA



INSTITUTO DE
GEOGRAFÍA



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE
FILOSOFÍA Y LETRAS



INSTITUTO DE
GEOGRAFÍA

Boletín de Estudios Geográficos

Nº 116

NOVIEMBRE 2021 – ABRIL 2022

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

MENDOZA, ARGENTINA

ISSN 0374-6186

E-ISSN 2525-1813

<http://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/beg>

arca
AREA DE REVISTAS
CIENTÍFICAS Y
ACADÉMICAS

DATOS DE REVISTA - JOURNAL'S INFORMATION

BOLETÍN DE ESTUDIOS GEOGRÁFICOS 116 | ISSN 0374-6186 | ISSN: 2525-1813 (digital) | NOV 2021-ABRIL 2022

Boletín de Estudios Geográficos (BEG) es una publicación del Instituto de Geografía.

Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.

 inst-geo@ffyl.uncu.edu.ar - <http://ffyl.uncu.edu.ar>

Centro Universitario - Ciudad de Mendoza (5500) - Casilla de Correo 345 – Provincia de Mendoza

Las contribuciones deben enviarse a través de OJS por el siguiente enlace:

<http://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/beg/about/submissions>

Puede ver un tutorial breve para autores en: http://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/beg/instructivo_autores

Para comunicarse con la revista utilice el mail  beg@ffyl.uncu.edu.ar



Email ARCA:  revistascientificas@ffyl.uncu.edu.ar

Facebook: [@arca.revistas](https://www.facebook.com/arca.revistas) | Instagram: [@arca.revistas](https://www.instagram.com/arca.revistas) | LinkedIn: ARCA – FFYL | Twitter: [@ArcaFFYL](https://twitter.com/ArcaFFYL)

Youtube: [área de revistas científicas ARCA](https://www.youtube.com/channel/UC...) | blog: <https://arcarevistas.blogspot.com/>

Diseño y maquetación: **Clara Luz Muñiz**  0000-0001-7184-0507  arca.clara@ffyl.uncu.edu.ar

 0000-0002-1350-9231  arca.angeles@ffyl.uncu.edu.ar

 editorial@ffyl.uncu.edu.ar

El Boletín de Estudios Geográficos es una publicación periódica bianual, originada en 1948, que comprende y difunde trabajos científicos originales, inéditos, relacionados con la amplitud temática de la Ciencia Geográfica, sus objetos y métodos específicos como así también de ciencias afines. Se publican también reseñas bibliográficas, tesis de grado y posgrado, reflexiones críticas, entrevistas a referentes de la disciplina, comentarios de eventos científicos.

La responsabilidad por las opiniones emitidas en los artículos corresponde exclusivamente a los autores.

Indexado en:

Catálogo 2.0 de Latindex <https://www.latindex.org/latindex/ficha?folio=26710>

REDIB https://redib.org/Record/oai_revista5728-bolet%C3%ADn-de-estudios-geogr%C3%A1ficos

ROAD <https://portal.issn.org/resource/ISSN/2525-1813#>

MIAR <http://miar.ub.edu/issn/0374-6186>

Dialnet <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=6366>

Google Scholar <https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=Adc2nYAAAAAJ>

Latinrev <https://latinrev.flaco.org.ar/revistas/boletin-estudios-geograficos>

PKP Index <http://index.pkp.sfu.ca/index.php/browse/index/9405>

ERIHPLUS <https://dbh.nsd.uib.no/publiseringskanaler/erihplus/periodical/info?id=493391>



Envíe su trabajo a:

 beg@ffyl.uncu.edu.ar

<https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/beg/about/submissions>

El envío de un artículo u otro material a la revista implica la aceptación de las siguientes condiciones:

- Que sea publicado bajo Licencia Creative Commons Atribución - NoComercial 4.0 internacional (CC BY NC 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.
- Que sea publicado en el sitio web oficial de “Boletín de Estudios Geográficos”, de la Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/beg/y> con derecho a trasladarlo a nueva dirección web oficial sin necesidad de dar aviso explícito a los autores.
- Que permanezca publicado por tiempo indefinido o hasta que el autor notifique su voluntad de retirarlo de la revista.
- Que sea publicado en cualquiera de los siguientes formatos: pdf, xlm, html, epub; según decisión de la Dirección de la revista para cada volumen en particular, con posibilidad de agregar nuevos formatos aún después de haber sido publicado.

¿Qué es el acceso abierto?

“El acceso abierto (en inglés, Open Access, OA) es el acceso gratuito a la información y al uso sin restricciones de los recursos digitales por parte de todas las personas. Cualquier tipo de contenido digital puede estar publicado en acceso abierto: desde textos y bases de datos hasta software y soportes de audio, video y multimedia. (...)”

Una publicación puede difundirse en acceso abierto si reúne las siguientes condiciones:

- Es posible acceder a su contenido de manera libre y universal, sin costo alguno para el lector, a través de Internet o cualquier otro medio;
- El autor o detentor de los derechos de autor otorga a todos los usuarios potenciales, de manera irrevocable y por un periodo de tiempo ilimitado, el derecho de utilizar, copiar o distribuir el contenido, con la única condición de que se dé el debido crédito a su autor;

De: <https://es.unesco.org/open-access/%C2%BFqu%C3%A9-es-acceso-abierto>

Política de acceso abierto: Esta revista proporciona acceso abierto inmediato a su contenido, basado en el principio de que ofrecer los avances de investigación de forma inmediata colabora con el desarrollo de la ciencia y propicia un mayor intercambio global de conocimiento. A este respecto, la revista adhiere a:

- PIDEESC. Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/derechoshumanos_publicaciones_colecciondebolsillo_07_derechos_economicos_sociales_culturales.pdf
- Creative Commons <http://www.creativecommons.org.ar/>
<https://www.budapestopenaccessinitiative.org/translations/spanish-translation>
https://openaccess.mpg.de/67627/Berlin_sp.pdf
- Declaración de Bethesda sobre acceso abierto https://ictlogy.net/articles/bethesda_es.html
- DORA. Declaración de San Francisco sobre la Evaluación de la Investigación <https://sfdora.org/read/es/>
- Ley 26899 Argentina. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/220000-224999/223459/norma.htm>
- Iniciativa Helsinki sobre multilingüismo en la comunicación científica <https://www.helsinki-initiative.org/es>

Proceso de evaluación por pares: Boletín de Estudios Geográficos considera para su publicación artículos inéditos y originales, los que serán sometidos a evaluación. La calidad científica y la originalidad de los artículos de investigación son sometidas a un proceso de arbitraje anónimo externo nacional e internacional. El proceso de arbitraje contempla la evaluación de dos jueces, que pertenecen a distintas instituciones y universidades.

Cuando se recibe algún artículo de investigación el mismo es sometido a una primera evaluación por parte del Comité de Publicación, quien determina la pertinencia y solvencia de la publicación. Una vez cumplido este proceso el artículo se envía a dos evaluadores externos con el sistema del doble ciego.

Se envía el artículo sin nombre de los autores a los evaluadores y una vez obtenido el resultado se remite a los autores sin el nombre de los evaluadores. En caso de que el trabajo no sea aceptado por uno de los evaluadores se envía a un tercero con la finalidad de su aprobación o rechazo definitivo.

Los evaluadores cuentan con una grilla diseñada por el Comité de Publicaciones, disponible en el sitio OJS del boletín.

La revista se reserva el derecho de incluir los artículos aceptados para publicación en el número que considere más conveniente. Los autores son responsables por el contenido y los puntos de vista expresados, los cuales no necesariamente coinciden con los de la revista.

Política de detección de plagio: Se utiliza el software Plagscan(<https://www.plagscan.com/es/>). Esta etapa de control está a cargo del Comité de redacción y el Editor de la revista.

Aspectos éticos y conflictos de interés: Damos por supuesto que quienes hacemos y publicamos en Boletín de Estudios Geográficos conocemos y adherimos tanto al documento CONICET: "Lineamientos para el comportamiento ético en las Ciencias Sociales y Humanidades" (Resolución N° 2857, 11 de diciembre de 2006) como a las [Prácticas Básicas del Committee on Publication Ethics](#) (2017). Son aplicables a todos los involucrados en la publicación de literatura académica: editores y sus revistas, editoriales e instituciones. Las Prácticas Básicas deben considerarse junto con códigos de conducta nacionales e internacionales específicos para la investigación y no tienen la intención de reemplazarlos. Para más detalles, por favor visite:<https://publicationethics.org/core-practices>.

Política de preservación: La información presente en el "Sistema de Publicaciones Periódicas" (SPP), es preservada en distintos soportes digitales diariamente y semanalmente. Los soportes utilizados para la "copia de resguardo" son discos rígidos y cintas magnéticas.

Copia de resguardo en discos rígidos: se utilizan dos discos rígidos. Los discos rígidos están configurados con un esquema de RAID 1. Además, se realiza otra copia en un servidor de copia de resguardo remoto que se encuentra en una ubicación física distinta a donde se encuentra el servidor principal del SPP. Esta copia se realiza cada 12 horas, sin compresión y/o encriptación.

Para las copias de resguardo en cinta magnéticas existen dos esquemas: copia de resguardo diaria y semanal.

Copia de resguardo diaria en cinta magnética: cada 24 horas se realiza una copia de resguardo total del SPP. Para este proceso se cuenta con un total de 18 cintas magnéticas diferentes en un esquema rotativo. Se utiliza una cinta magnética por día, y se va sobrescribiendo la cinta magnética que posee la copia de resguardo más antigua. Da un tiempo total de resguardo de hasta 25 días hacia atrás.

Copia de resguardo semanal en cinta magnética: cada semana (todos los sábados) se realiza además otra copia de resguardo completa en cinta magnética. Para esta copia de resguardo se cuenta con 10 cintas magnéticas en un esquema rotativo. Cada nueva copia de resguardo se realiza sobre la cinta magnética que contiene la copia más antigua, lo que da un tiempo total de resguardo de hasta 64 días hacia atrás.

Los archivos en cinta magnética son almacenados en formato "zi", comprimidos por el sistema de administración de copia de resguardo. Ante la falla eventual del equipamiento de lectura/escritura de cintas magnéticas se poseen dos equipos lecto-grabadores que pueden ser intercambiados. Las cintas magnéticas de las copias de resguardo diarios y semanal son guardados dentro de un contenedor (caja fuerte) ignífugo.

Copia de resguardo de base de datos: se aplica una copia de resguardo diario (dump) de la base de datos del sistema y copia de resguardo del motor de base de datos completo con capacidad de recupero ante fallas hasta (5) cinco minutos previos a la caída. Complementariamente, el servidor de base de datos está replicado en dos nodos, y ambos tienen RAID 1.





Se permite la reproducción de los artículos siempre y cuando se cite la fuente. Esta obra está bajo una Licencia Atribución-No Comercial 4.0 internacional (CC BY-NC 4.0). Usted es libre de: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato; adaptar, transformar y construir a partir del material citando la fuente. Bajo los siguientes términos: Atribución —


debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. No Comercial —no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>


Esta revista se publica a través del SID (Sistema Integrado de Documentación), que constituye el repositorio digital de la Universidad Nacional de Cuyo (Mendoza): <http://bdigital.uncu.edu.ar/>, en su Portal de Revistas Digitales en OJS: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php>. Nuestro repositorio digital institucional forma parte del SNRD (Sistema Nacional de Repositorios Digitales) <http://repositorios.mincyt.gob.ar/>, enmarcado en la leyes argentinas: Ley N° 25.467, Ley N° 26.899, Resolución N° 253 del 27 de diciembre de 2002 de la entonces SECRETARÍA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN PRODUCTIVA, Resoluciones del MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN PRODUCTIVA N° 545 del 10 de septiembre del 2008, N° 469 del 17 de mayo de 2011, N° 622 del 14 de septiembre de 2010 y N° 438 del 29 de junio de 2010, que en conjunto establecen y regulan el acceso abierto (libre y gratuito) a la literatura científica, fomentando su libre disponibilidad en Internet y permitiendo a cualquier usuario su lectura, descarga, copia, impresión, distribución u otro uso legal de la misma, sin barrera financiera [de cualquier tipo]. De la misma manera, los editores no tendrán derecho a cobrar por la distribución del material. La única restricción sobre la distribución y reproducción es dar al autor el control moral sobre la integridad de su trabajo y el derecho a ser adecuadamente reconocido y citado.

COMITÉ DE PUBLICACIONES

Diego Bombal – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina  orcid.org/0000-0001-5200-8117

Facundo Rojas – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina  orcid.org/0000-0003-3704-0199

Facundo Martín – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina  orcid.org/0000-0003-0709-249X


Fernando Ruiz Peyré – Universidad de Innsbruck – Austria  orcid.org/0000-0003-3646-3974


Gabriela Maldonado – Universidad Nacional de Río Cuarto – Argentina

Carla Marchant – Universidad Austral – Chile  orcid.org/0000-0002-4040-8372

Correctora de Estilo: Ester Argüello – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

Directora: **Silvia Beatriz Robledo** – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina  orcid.org/0000-0001-8848-1459

Subdirector: **Diego Bombal** – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina  orcid.org/0000-0001-5200-8117

Secretario: **Facundo Rojas** – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina  orcid.org/0000-0003-3704-0199

Comisión Asesora:

Pablo Rizzo – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina

Claudio Urra Colleti – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina

Clarisa Suden – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina

Renzo Salatino – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina

Secretaría Administrativa: Ester Argüello – Universidad Nacional de Cuyo – Argentina

Directores del dossier

Dr. Andrés Lo Vecchio  orcid.org/0000-0002-3606-9160

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IANIGLA-CONICET). Departamento de Geografía (Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo)

Dr. Sebastián Andrés Crespo Oliva  orcid.org/0000-0003-3142-751X

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2

AUTORIDADES

Decano de la Facultad de Filosofía y Letras: Dr. Adolfo Omar Cueto
Directora del Boletín de Estudios Geográficos: Prof. Esp. Silvia Beatriz Robledo

COMITÉ ACADÉMICO

Mag. Raquel Alvarado - Universidad de la República - Uruguay.
Dr. Guillermo Velázquez - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas / Universidad Nacional del Centro - Argentina.
Dra. Cristina Valenzuela - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas / Universidad Nacional del Nordeste - Argentina.
Dra. Alicia Laurín - Universidad Nacional del COMAHUE - Argentina.
Dra. Claudia Pedone - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -Argentina.
Dr. Horacio Bozzano - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas / Universidad Nacional de La Plata - Argentina.
Dr. Roberto Bustos Cara - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas / Universidad Nacional del Sur-Argentina.
Dra. Alicia Iglesias - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas / Universidad Nacional de Luján -Argentina.
Lic. Alicia Cáceres - Universidad Nacional Patagonia Austral - Argentina.
Dra. Claudia Campos -Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -Argentina.
Dra. Mirosława Czerny - Universidad de Varsovia - Polonia.
Dr. Gustavo Buzai - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas / Universidad Nacional de Luján- Argentina.
Dr. Fabián Araya Palacios - Universidad de La Serena -Chile.
Dra. Hortensia Castro - Universidad de Buenos Aires - Argentina.
Mag. Guillermo Cicalese - Universidad Nacional de Mar del Plata - Argentina.
Dr. Santiago Linares - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas/ Universidad Nacional del Centro - Argentina.
Lic. Santiago Llorens - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas/ Universidad Nacional de Córdoba - Argentina.
Dr. Pablo Paolasso - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas/ Universidad Nacional de Tucumán - Argentina.
Dr. Francisco do O' de Lima Júnior - Universidade Regional do Cariri, -Brasil.
Dr. Sebastián Crespo - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Chile.
Dr. Bernardo Mançano Fernandes - Universidade Estadual Paulista - Brasil.
Dr. Eudes Leopoldo - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará -Brasil.
Dr. Robin Larsimont - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -Argentina.
Dr. Jodival Maurício Da Costa - Universidade Federal do Amapá - Brasil.
Dr. Ricardo Bohl Pazos – Pontificia Universidad Católica de Perú - Perú

Imagen de la portada: Foto de Andrés Lo Vecchio Repetto, con edición digital de Clara Luz Muñiz. Corresponde a la laguna "Upsala" en las inmediaciones del glaciar de nombre homónimo en la provincia de Santa Cruz " 49° 54' 18" Lat. S. y 73° 10' 37" Long. O. El retroceso glaciar experimentado a partir del fin de la Pequeña Edad de Hielo, hacia fines del siglo XIX, es responsable de diversos rasgos geomorfológicos presentes en los Andes Patagónicos Australes. Ese es el caso de la laguna Upsala, también conocida como una cubeta glaciar, depresión topográfica rellenada por agua derivada de la ablación glaciar. Usualmente, las cubetas suelen encontrarse cercanas a algunas otras, separadas por resaltes topográficos conocidos como umbrales. La secuencia de umbrales y cubetas ha dado lugar a lo que puede reconocerse como lagunas en rosario, geoforma típica de un ambiente que antaño estuvo ocupado por masas de hielo. La imagen fue tomada durante un amanecer de abril de 2016.

ÍNDICE

Dossier

Geografía de montaña: Situación de las fuentes y reservas de agua dulce en los Andes. *Mountain geography: Situation of fresh water sources and reserves in the Andes*

Directores del Dossier: Andrés Lo Vecchio y Sebastián Andrés Crespo Oliva 11

INTRODUCCIÓN AL DOSSIER

Geografía de montaña: situación de las fuentes y reservas de agua dulce en los Andes. *Mountain geography: situation of fresh water sources and reserves in the Andes*

Andrés Lo Vecchio y Sebastián Andrés Crespo Oliva 13

INVESTIGACIONES

Cuantificación del déficit hidrológico reciente en la región de Cuyo a partir de indicadores de caudales bajos. *Quantification of the recent hydrological deficit in the Cuyo region from low flow indicators*

Juan Rivera, Carolina Lauro, Sebastián Alfredo Otta 23

Recursos hídricos superficiales de la vertiente oriental de los Andes Centrales (28°-37°S) en contexto de variabilidad hidroclimática. *Surface water resources in the eastern slope of the Central Andes (28°-37°S) in a context of hydroclimatic variability*

Carolina Lauro, Alberto Ismael Juan Vich, Sebastián Alfredo Otta, Stella Maris Moreiras, Emilce Liliana Belén Vaccarino Pascuali, Luis Bernardo Bastidas Mejías 45

El recurso hídrico asociado a lagos en los Andes Centrales de Argentina (31°-36° S). *The water resource associated with lakes in the Central Andes of Argentina(31°-36° S)*

Mariana Correas-Gonzalez, Stella Maris Moreiras 73

Las formas jurídicas de las fuentes y reservas de agua en los Andes argentinos. *Legal forms of water sources and reservoirs in the Argentine Andes*

Mauricio Pinto y Liber Martin 103

Cambios en la cobertura de nieve y su relación con el caudal para la caracterización, monitoreo y gestión de las cuencas de montaña en los Andes extratropicales de Chile entre los 29° y 37°S utilizando teledetección. *Changes in snow cover and its relationship with flow for the characterization, monitoring and management of mountain basins in the extratropical Andes of Chile between 29° and 37°S using remote sensing*

Ana Guadalupe Hernández-Duarte, Jean Pierre Francois Sepúlveda, Valentina Ignacia Contreras Figueroa, Flavia Renne Saud Valero, Freddy Alejandro Saavedra Pimentel 123

Hidrogeología y modelo conceptual del acuífero de Petorca en el sector alto de la cuenca homónima. Región de Valparaíso, Chile. *Hydrogeology and aquifer conceptual model of Petorca's upper basin (Valparaíso, Chile)*

Justinne Andrea Rybertt Goldammer 157

TESIS DE POSGRADO

Dinámica glacial de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: el agua del futuro. *Santa Cruz river basin's glacier dynamic: fresh water of future*

Andrés Lo Vecchio Repetto 187

RESEÑAS Y CRÍTICA BIBLIOGRÁFICA

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. *Atlas de Glaciares de la Argentina* / compilado por Leandro García Silva ... [et al.]. 1ra edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2019. 224 páginas ; 28 x 23 cm. ISBN 978-987-46796-9-7

Por Emilia Carolina Martínez

217

DOSSIER

Geografía de montaña: Situación de las fuentes y reservas de agua dulce en los Andes


**Mountain geography:
Situation of fresh water sources and reserves in the Andes**

Directores del Dossier

Dr. Andrés Lo Vecchio  orcid.org/0000-0002-3606-9160

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales,
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IANIGLA-CONICET). Departamento de Geografía
(Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina)

 anlovecchio@ffyl.uncu.edu.ar

Dr. Sebastián Andrés Crespo Oliva  orcid.org/0000-0003-3142-751X

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

 sebastian.crespo@pucv.cl

INTRODUCCIÓN AL DOSSIER

Geografía de montaña: situación de las fuentes y reservas de agua dulce en los Andes

Mountain geography: situation of fresh water sources and reserves in the Andes

Coordinadores del dossier:

Dr. Andrés Lo Vecchio

 orcid.org/0000-0002-3606-9160

Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

 anlovecchio@ffyl.uncu.edu.ar

Dr. Sebastián Andrés Crespo

 orcid.org/0000-0003-3142-751X

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)

 sebastian.crespo@pucv.cl

La disponibilidad de agua dulce de fácil acceso es apenas una fracción diminuta del total que existe en el planeta Tierra; de hecho, menos de una diez milésima parte de esta se puede usar con facilidad y a un costo razonable (Guhl Nannetti, 2010). El rápido crecimiento de la población mundial se traduce en un aumento de la demanda hídrica y en la contaminación de los reservorios y fuentes de agua dulce, creando una tendencia progresiva hacia la escasez. La posibilidad de conflictos internacionales en cuencas compartidas por varios países ya se evidencia, en

especial en zonas con baja disponibilidad de agua. Por estas razones, las regiones con abundante agua son el objetivo estratégico de intereses que aspiran a crear un mercado basado en el control de un bien indispensable para la vida.

A nivel mundial, cerca del 70% de las reservas de agua dulce se encuentran en glaciares y casquetes polares. Apenas el 0,3% se encuentra en lagos y ríos, mientras que la porción restante está distribuida entre aguas subterráneas, humedad del suelo, pantanos y humedad atmosférica (Williams y Ferrigno 2012). En Sudamérica, la cordillera de los Andes es un eje estructurador del espacio geográfico y desde su levantamiento ha configurado una amplia variedad de topoclimas que resultan en una gran diversidad de fuentes y reservas de agua dulce que históricamente han sido aprovechadas por los enclaves humanos (Secretaría General de la Comunidad Andina, 2007).

A escala regional, las fuentes y reservas de agua estratégicas para los habitantes del dominio andino pueden resumirse en las precipitaciones sólidas y líquidas, en el ambiente glaciar y periglaciar, en los humedales y los acuíferos subterráneos. La significancia de cada una de estas sugiere un claro componente espacial: en el extremo sur de Sudamérica los regímenes hídricos son ultraglaciares (Vich 1996) (ej. río Santa Cruz), situación que comienza a transformarse hacia Patagonia Norte y Andes centrales donde el régimen es particularmente nival (Masiokas et al. 2016, 2009; Lauro et al., 2016), aunque en años secos son los glaciares los que aportan hasta más de la mitad de los caudales (Crespo et al. 2020^{a,b}). El régimen nival domina los ríos andinos de los andes áridos, incluso en el altiplano boliviano-peruano en torno al lago Titicaca. Finalmente, hacia la zona ecuatorial el régimen hídrico de los ríos andinos tiene una fuerte componente pluvial, aunque al igual que en los Andes centrales, en años secos los glaciares juegan un rol preponderante en el sostén de caudales ecológicos (Buytaert et al., 2017).

La reducción y pérdida de masa glaciar ha sido evidenciada sobre los diferentes ambientes glaciales de los Andes, con las máximas pérdidas en los Andes Patagónicos del sur y en los Andes Tropicales (Dussaillant et al. 2019). Mientras que en los Andes extratropicales la causa parece ser la reducción de la precipitación nival (Mernild et al. 2017), en los Andes tropicales el calentamiento del océano Pacífico ha mostrado ser quien modula esa reducción (Veettil y Kamp 2017; Veettil et al., 2018).

De hecho, durante el siglo XX las precipitaciones no reportaron una tendencia negativa o positiva significativa (Rabatel et al. 2013).

En muchas de las regiones áridas y semiáridas de Sudamérica el agua de ablación nivoglaciaria es la única fuente para consumo humano, agricultura, industria, al mismo tiempo que para otros organismos vivos y el sostén de ecosistemas. Incluso, se ha observado el fuerte control de la presencia (ausencia) de ríos perennes en la fundación de asentamientos humanos, especialmente en el sector occidental de la República Argentina (Lo Vecchio 2020). En ese contexto, la deglaciación generalizada y acelerada observada desde principios del siglo XX está impactando en la organización y gestión de las sociedades. Un ejemplo son los nuevos escenarios de riesgo producto del incremento de la exposición a peligros naturales (Orlove et al., 2008).

Las Naciones Unidas estimó que, en el año 2019, 2.200 millones de personas no tuvieron acceso al suministro de agua tratada y 4.200 millones no contaron con acceso al saneamiento básico (WHO-UNICEF, 2019), dos condiciones fundamentales para llevar una vida saludable y digna. Existe una valoración creciente del agua, su importancia funcional, simbólica y recreacional la reafirma como el recurso esencial para la vida (Guhl Nannetti 2010). En ese contexto, la protección y conservación de las fuentes y reservas de agua dulce comienza a ser una preocupación de la comunidad en general, como el caso de Argentina que desde 2010 cuenta con la Ley Nacional de Glaciares (N° 26.639) que establece y considera a los glaciares como reservas estratégicas de recursos hídricos (Zalazar et al. 2017). En ese marco, en la República de Chile se están llevando adelante intentos similares a favor de la legislación que proteja el ambiente glaciar como recurso estratégico.

Persiguiendo un espíritu de contribución y fortalecimiento sobre el conocimiento existente acerca de las fuentes y reserva de agua dulce en los Andes, e incluso sobre los aspectos referidos a su manejo y gestión, este dossier está compuesto por ocho trabajos (seis artículos científicos y dos reseñas). En total, 16 autores han participado de este número.

El factor común entre los diversos trabajos científicos aquí presentados tiene que ver con la identificación y análisis de procesos de sequías naturales y eventualmente

estimuladas por la actividad antrópica, como lo muestra Justinne Rybertt en su trabajo **“Hidrogeología y modelo conceptual del acuífero de Petorca en el sector alto de la cuenca homónima. Región de Valparaíso, Chile”** en donde en un marco de sequía natural, los efectos de la actividad antrópica estarían jugando un rol preponderante en la intensificación de esas condiciones previas.

En ese contexto, el trabajo de J. Rivera, C. Lauro y S. Otta **“Cuantificación del déficit hidrológico reciente en la región de Cuyo a partir de indicadores de caudales bajos”** nos pone de manifiesto las sequías hidrológicas experimentadas por los ríos andinos de la región de Cuyo (Argentina), especialmente a partir de 2010. En particular, los déficits más pronunciados fueron identificados en los registros de los ríos Atuel y Colorado, ambos al sur de la provincia de Mendoza.

En esa sintonía, el trabajo **“Recursos hídricos superficiales de la vertiente oriental de los Andes Centrales (28°-37°S) en contexto de variabilidad hidroclimática”** de C. Lauro, A. Vich, S. Otta, S. Moreiras, E. Vaccarino y L. Bastidas muestra la relación existente en los Andes Centrales argentinos entre la reducción de precipitaciones y caudales, al mismo tiempo que la tendencia es positiva para las temperaturas, lo cual soporta los escenarios de sequías hidrológicas abordados por Rivera y colaboradores. En un esfuerzo equivalente, A. Hernández Duarte en **“Cambios en la cobertura de nieve y su relación con el caudal para la caracterización, monitoreo y gestión de las cuencas de montaña en los Andes extratropicales de Chile entre los 29° y 37°S utilizando teledetección”** muestra la estrecha dependencia de los caudales y la precipitación sólida en Andes Centrales chilenos, con un rango de desfase entre 60 y 160 días de la máxima superficie cubierta de nieve y el máximo caudal registrado.

La reducción de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas han estimulado el retroceso del ambiente glaciar, eventualmente traducido en la formación de lagos y lagunas. Estos pueden significar un recurso hídrico alternativo para las comunidades andinas, como también una amenaza. De allí que M. Correas y S. Moreiras en **“El recurso hídrico asociado a lagos en los Andes Centrales de Argentina (31°-36° S)”** mapean y analizan 641 cuerpos de agua localizados en Andes Centrales e identifican su origen como insumo de base para los tomadores de decisiones.

En vistas de las sequías hidrológicas presentes y proyectadas, la gestión del recurso hídrico asume un rol preponderante entre las acciones llevadas adelante para mitigar los efectos del Cambio Ambiental Global. En la República Argentina existe un marco jurídico que norma las fuentes y reservas de agua dulce, tema abordado en el artículo de M. Pinto y L. Martín **“Las formas jurídicas de las fuentes y reservas de agua en los Andes argentinos”**. Allí, los autores evalúan el efecto de la modificación del Código Civil y Comercial (2015) respecto de la titularidad dominial del recurso hídrico en las distintas etapas de su ciclo.

En ese contexto, uno de los instrumentos existentes para la protección del recurso hídrico es el Inventario Nacional de Glaciares, quien es presentado en sus principales términos en la reseña de C. Martínez **“Atlas de glaciares de la Argentina”**. De ese inventario se desprende que el 52% de la cubierta glacial presente en los Andes de Argentina está concentrada en la cuenca del río Santa Cruz, la cuenca **“del futuro”** de acuerdo la reseña de tesis doctoral presentada por A. Lo Vecchio **“Dinámica glacial de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: el agua del futuro”**. En esta, se muestra como el comportamiento de los glaciares más extensos del país han experimentado un comportamiento dispar entre ellos, incluso en casos donde comparten zona de alimentación. Esto último pone de manifiesto la necesidad de estudios locales.

BIBLIOGRAFÍA

Crespo, S., Fernandoy, F., Cara, L., Klarian, S., y Lavergne, C.. (2020)^a. First snow, glacier and groundwater contribution quantification in the upper Mendoza River basin using stable water isotopes. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 56 (5-6): 566-85. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1797713>.

Crespo, S., Lavergne, C., Fernandoy, F., Muñoz, A., Cara, L., y Olfos-Vargas, S.,. 2020^b. 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>.

Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P. y L. Ruiz. 2019. «Two decades of glacier mass loss along the Andes». *Nature Geoscience* 12 (10): 802-8. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>.

Guhl Nannetti, E., (2010). *El agua de los Andes. Un recurso clave para el desarrollo e integración de la región*. Lima. <http://www.flickr.com/photos/twiga269>.

Lauro, C., Vich, A., y Moreiras, M., (2016). Streamflow variability of river basins from Cuyo region. *Geoacta* 40 (2): 28-51.

Lo Vecchio, A.. (2020). "Dinámica glaciar de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: estudio y análisis multiescalar mediante el uso de geotecnologías". Tesis de Doctorado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras ,Universidad Nacional de Cuyo.

Masiokas, M., Christie, D., Le Quesne, C., Pitte, P., Ruiz, L., Villalba,R., Luckman, B., et al. (2016). Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte glacier (Central Andes, 33.5° S) using local and regional hydroclimatic data. *Cryosphere* 10 (2): 927-40. <https://doi.org/10.5194/tc-10-927-2016>.

Masiokas, M., Rivera, A., Espizua,L., Villalba,R., Delgado,S, y Aravena,J. C., 2009. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281 (3-4): 242-68. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.08.006>.

Mernild, S. , Liston, G., Hiemstra, C., Malmros, J., C. Yde, J., y McPhee, J., (2017). The Andes Cordillera. Part I: snow distribution, properties, and trends (1979–2014). *International Journal of Climatology* 37 (4): 1680-98. <https://doi.org/10.1002/joc.4804>.

Orlove, B.,Wiegandt, E., y Luckman.B., (2008). *Darkening peaks : glacier retreat, science, and society*. University of California Press. https://books.google.com.ar/books?hl=es&lr=&id=vgJ1EKyK8RoC&oi=fnd&pg=PA3&dq=darkening+peaks&ots=Wh0xE5xDX8&sig=xeswnRma8WenH2CP9L_cMNSMqwU&redir_esc=y#v=onepage&q=darkening+peaks&f=false.

Rabatel, A., Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Cáceres, J. L. Ceballos, Basantes, R., et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere* 7 (1): 81-102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>.

Secretaría General de la Comunidad Andina, Instituto de Investigación para el Desarrollo, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, y Agencia Español de Cooperación Internacional. (2007). *¿El Fin de las Cumbres Nevadas? Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina*. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-03/010042829.pdf.

Veettil, Bijeesh K., y Kamp.U., (2017). Remote sensing of glaciers in the tropical Andes: a review. *International Journal of Remote Sensing* 38 (23): 7101-37. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371868>.

Bijeesh Kozhikkodan, V., Wang, S., Cardia Simões, J., Ruiz Pereira,S y Florêncio de Souza.S., (2018). Regional climate forcing and topographic influence on glacier shrinkage: eastern cordilleras of Perú. *International Journal of Climatology* 38 (2): 979-95. <https://doi.org/10.1002/joc.5226>.

Vich, A., (1996). *Aguas continentales: formas y procesos*. Primera. Mendoza: Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua.

WHO-UNICEF. (2019). Agua | Naciones Unidas. *Agua*. 2019. <https://www.un.org/es/global-issues/water>.

Williams, R. y Ferrigno. J. (2012). State of the Earth's Cryosphere at the Beginning of the 21st Century: Glaciers, Global Snow Cover, Floating Ice, and Permafrost and Periglacial Environments - Global Snow Cover. *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*, 254. <http://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery1-fig16.html>.

Wouter, B., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C., y Verbist, K., (2017). Glacial melt content of water use in the tropical Andes, *Environmental Research Letters* 12 (11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa926c>.

Zalazar, L., Ferri, L., Castro, M., Gargantini, H., Giménez, M., Pitte, P., Ruiz, L. y Masiokas, M., (2017). Glaciares de Argentina : Resultados Preliminares del Inventario Nacional de Glaciares Glaciers of Argentina : Preliminary Results of the National Inventory of Glaciers, (2), (13-22 pp.) October.

LOS AUTORES

Andrés Lo Vecchio Repetto, es Geógrafo profesional y Doctor en Geografía por la Universidad Nacional de Cuyo. Actualmente posee una beca postdoctoral de CONICET y es Profesor Asociado Efectivo de las de Filosofía y Letras (UNCuyo). Su actividad científica está mayormente orientada al estudio de la dinámica glaciar en los Andes Argentinos a través de la integración de técnicas geomáticas, todo ello traducido en más de 10 publicaciones científicas en revistas de relevancia internacional. Además, también está interesado en el desarrollo y aplicación de herramientas digitales en la enseñanza de la Geografía a través de la construcción de la primera Mesa Topográfica Digital de una Universidad Pública de la República Argentina y en el desarrollo de modelos de Realidad Aumentada de diversos escenarios naturales y humanizados.

Sebastián Andrés Crespo Oliva, es Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Cuyo, Doctor en Ciencias Aplicadas otorgado por la Universidad Nacional de Luján y doctorando en Ciencias Sociales con orientación en Geografía de la Universidad Nacional de Tucumán. Realizó y finalizó un postdoctorado en CONICET (Argentina) y otro en CONICYT (Chile, Fondecyt N°3180682). Actualmente es Director del Laboratorio de Territorios Hidrosociales y Cambio Climático, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Es investigador del Centro de Acción Climática y Profesor Asociado en el Instituto de Geografía de dicha universidad. Es investigador del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2.

INVESTIGACIONES



Cuantificación del déficit hidrológico reciente en la región de Cuyo a partir de indicadores de caudales bajos

Quantification of the recent hydrological deficit in the Cuyo region from low flow indicators

 <https://doi.org/10.48162/rev.40.006>

Juan Rivera  orcid.org/0000-0001-7754-1612

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA),
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina

 jrivera@mendoza-conicet.gob.ar

Carolina Lauro  orcid.org/0000-0001-7150-3885

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA),
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina

 clauro@mendoza-conicet.gob.ar

Sebastián Alfredo Otta  orcid.org/0000-0003-4189-9406

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA),
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina

 sotta@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Esta investigación realiza una cuantificación del déficit en los caudales superficiales de los principales ríos de la región de Cuyo, asociado a la extraordinaria sequía hidrológica registrada desde el año 2010. Estos déficits presentan valores récord en el contexto de los últimos 50 años, en particular durante el año hidrológico 2019/20. Las diferencias regionales en los valores de déficit acumulado permiten establecer que la mayor severidad se observó en las cuencas de los ríos Atuel y Colorado, las cuales en promedio registraron caudales por debajo del percentil de excedencia del 80% (Q80) durante el período 2010/11-2019/20. A partir de la estandarización del déficit acumulado por el volumen de los embalses de la región, se obtuvo una medida de fácil

interpretación y aplicación para el monitoreo y la toma de decisiones en relación al impacto de la sequía hidrológica en la disponibilidad de agua dulce regional.

PALABRAS CLAVE: sequía hidrológica, embalses, Andes Centrales, Cuyo, gestión de los recursos hídricos

ABSTRACT

This study quantifies the deficit in the streamflows of the main rivers in the Cuyo region, associated with the extraordinary hydrological drought recorded since 2010. These deficits show record-breaking values in the context of the last 50 years, particularly during the 2019/20 hydrological year. Regional differences in cumulative deficit values allow us to establish that the greatest severity was observed in the Atuel and Colorado river basins, which on average recorded streamflows below the 80% exceedance percentile (Q80) during the 2010/11-2019/20 period. By standardising the cumulative deficit by the volume of the region's reservoirs, we obtained a measure that is easy to interpret and to apply for monitoring and decision-making regarding the impact of hydrological drought on regional freshwater availability.

KEYWORDS: hydrological drought, reservoirs, Central Andes, Cuyo, water management

INTRODUCCIÓN

La porción de la Cordillera de los Andes ubicada aproximadamente entre 28°S y 37°S constituye las nacientes de diversos ríos que pertenecen al sistema hidrológico del río Colorado. Estos ríos se alimentan, principalmente, del derretimiento nival y son la principal fuente de agua superficial para los oasis irrigados de la región de Cuyo, donde se desarrollan las principales actividades socio-económicas de la región (Rivera et al., 2017, a). En particular, los últimos 11 años estuvieron dominados por un período prolongado de sequía hidrológica en el cual el déficit en la cantidad de nieve acumulada se propagó a lo largo de las distintas componentes del ciclo hidrológico regional (Rivera et al., 2021). Esto motivó a considerar este período deficitario como una “nueva normalidad” por parte del Departamento General de Irrigación (DGI), ente encargado del manejo de los recursos hídricos en la provincia de Mendoza. Esta declaración no parece ser errada si se tiene en cuenta la creciente cantidad de estudios que proporcionan evidencias del impacto del cambio climático proyectado en los recursos hídricos de la región de Cuyo. Los aumentos en la temperatura serán más pronunciados en las elevaciones más altas de la Cordillera

de los Andes en comparación con los cambios esperados en las zonas del llano, en consonancia con una reducción significativa del albedo (Zazulie et al., 2018). Los niveles de calentamiento propuestos en el Acuerdo de París (1,5°C y 2,0°C) serán superados en las elevaciones de los Andes entre 10 y 15 años antes (2019-2035) que en las elevaciones más bajas del Centro Oeste de Argentina (Rivera et al., 2020). Se espera que los cambios proyectados en los patrones de circulación regional, como la expansión hacia el sur de la circulación de Hadley, favorezcan la continuidad de la disminución de la precipitación observada a lo largo del último siglo, lo que dará como resultado condiciones de sequía más frecuentes (Almazroui et al., 2021; Rivera et al., 2020; Spinoni et al., 2020; Villamayor et al., 2021). La disminución de las precipitaciones, junto con el aumento previsto en la temperatura, generará pérdidas en el balance de masa de los glaciares, con un derretimiento anticipado de la cobertura de nieve, lo cual se espera que tenga serias implicancias para las prácticas de gestión del agua (Zazulie et al., 2018; Hock et al., 2019). Por ejemplo, se espera que continúen los cambios actuales en las zonas vitícolas, con una proyección de desplazamiento hacia el suroeste y hacia zonas de mayor altitud durante las próximas décadas (Cabré y Nuñez, 2020). Por todo lo expuesto, queda claro que las condiciones climáticas futuras sobre la región de Cuyo probablemente exacerbarán la ocurrencia de sequías hidrológicas, haciendo imperativo no solo un mejor sistema de monitoreo sino también el desarrollo de servicios climáticos como una herramienta para ayudar a las estrategias de adaptación a nivel de cuenca.

El conocimiento de los períodos prolongados de caudales por debajo de lo normal es un aspecto importante en la planificación de los sistemas de recursos hídricos y en la asignación de los caudales disponibles para una variedad de usos que compiten entre sí (Dracup et al., 1980). El volumen deficitario es una variable sumamente relevante para la gestión de los recursos hídricos, dado que permite cuantificar los valores absolutos de la cantidad de agua que falta con respecto a las condiciones normales (Van Loon, 2015). En función de la problemática planteada, el objetivo de este estudio es evaluar el déficit en los caudales superficiales de los principales ríos de la región de Cuyo durante la sequía hidrológica reciente y su impacto en las reservas de agua de los principales embalses. Para la caracterización de las condiciones de sequía hidrológica en los principales cursos de agua de la región se

utilizó un conjunto de indicadores de caudales bajos en escala diaria, definidos a partir de las curvas de duración de caudal, los cuales se describen en la sección 3. Los principales resultados de esta investigación se muestran en la sección 4, a partir de la cuantificación del déficit hídrico, del impacto en los embalses a lo largo de la última década y de la evolución temporal del déficit en el contexto de los últimos 50 años. La sección 5 plantea la discusión de los resultados obtenidos y las posibles formas de abordar la problemática de la sequía hidrológica, considerando una mejora en el conocimiento de la hidrología regional. Finalmente, la sección 6 resume las principales conclusiones del estudio y las recomendaciones a tener en cuenta.

2. Área de estudio

El análisis se llevó a cabo considerando los principales ríos de las cuencas hidrográficas localizadas entre los 30°S y 37°S del centro-oeste de Argentina (**Figura 1**). A continuación se detallan algunas de sus características a partir de información obtenida a través de organismos como Energía Provincial Sociedad del Estado (EPSE, <http://epse.com.ar>), DGI (<http://irrigacion.gov.ar/web/>), el Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP, <http://argentina.gob.ar/orsep>), y el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC, <http://indec.gob.ar>).

La cuenca del río San Juan cuenta con una superficie de más de 38.000 km² en toda su extensión. A lo largo del curso del río San Juan se encuentran tres sistemas de embalses cuya principal función es la de regular los escurrimientos y la generación de energía. El embalse Ullúm, que comenzó sus operaciones en el año 1980 y posee una capacidad de 440 hm³; el embalse Los Caracoles, el más importante de la cuenca, con una capacidad de 565 hm³, cuya puesta en funcionamiento se dio durante 2008; y el embalse Punta Negra, que inició sus actividades durante 2015 y posee una capacidad máxima de 500 hm³. La superficie irrigada es de 1119 km² y la cuenca posee una población de más de 700.000 habitantes. Se prevé que el embalse Tambolar, cuya capacidad máxima proyectada es de 605 hm³, entre en funcionamiento en los próximos años, incrementando en gran medida el volumen de almacenamiento de agua para hacer frente a las proyecciones de disminución en la disponibilidad de agua en el futuro.

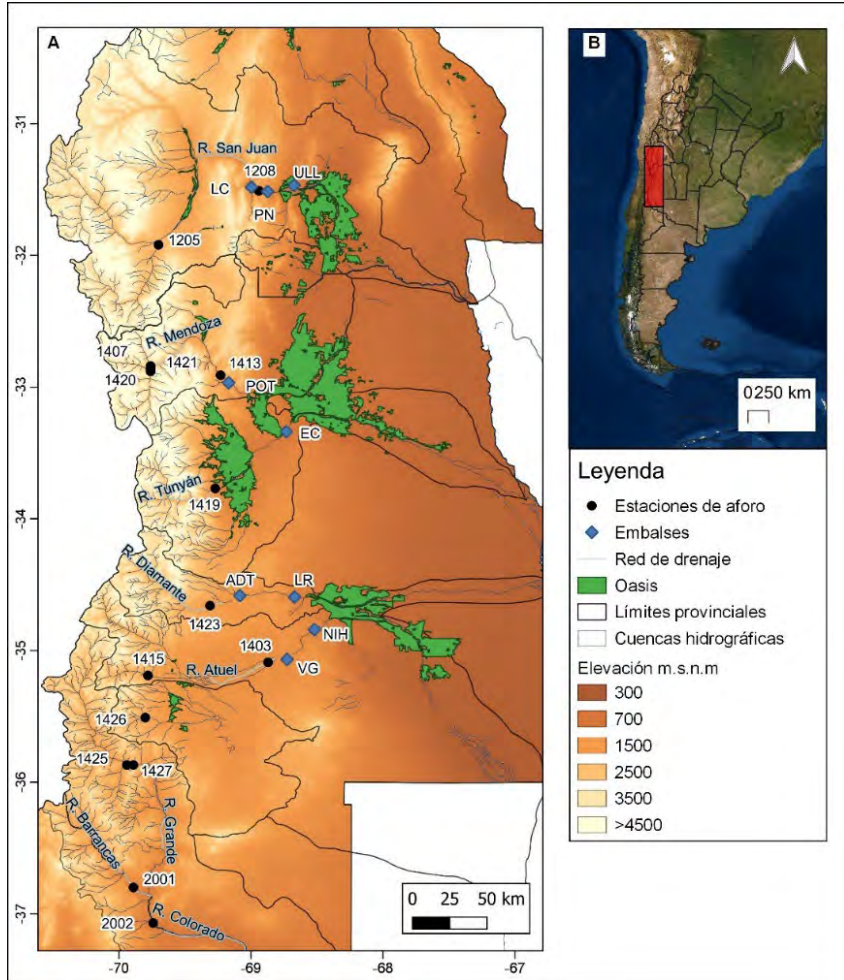


Figura 1. A) Ubicación del área de estudio, con los principales ríos, la ubicación de las estaciones de aforo, los embalses y los oasis irrigados; B) entorno regional y características orográficas de la región de Cuyo. Los nombres de los embalses son los siguientes: PN = Punta Negra; ULL = Ullúm; LC = Los Caracoles; POT = Potrerillos; EC = El Carrizal; ADT = Agua del Toro; LR = Los Reyunos; VG = Valle Grande; NIH = Nihuil

La cuenca del río Mendoza posee una extensión de aproximadamente 20.000 km², y abastece el denominado oasis Norte de la provincia homónima. Dicho oasis posee

una superficie irrigada de 1108 km² y allí se concentra la mayor cantidad de población de la región de Cuyo, con más de un millón de habitantes. El dique Potrerillos regula los caudales del río Mendoza para abastecimiento poblacional, riego, usos industriales y generación de energía. Posee una capacidad máxima de 393 hm³ y se puso en funcionamiento durante 2001.

En la zona centro-norte de la provincia de Mendoza se localiza la cuenca del río Tunuyán, con una superficie de 18.954 km² y una población de 408.734 habitantes. Posee la mayor superficie irrigada de la provincia, con 1364 km², donde el río Tunuyán abastece el denominado oasis Centro (sub-cuenca Tunuyán Superior) y aguas abajo del embalse el Carrizal, la zona sur-este del oasis Norte (sub-cuenca Tunuyán Inferior). Los principales usos del embalse, que posee una capacidad máxima de 322 hm³ y fue inaugurado en 1971, son la regulación estacional del caudal para el riego y la generación de energía.

La cuenca del río Diamante posee una superficie aproximada de 11.000 km² y una población más de 200.000 habitantes. El río Diamante abastece parte del oasis Sur de la provincia de Mendoza, el cual posee una superficie irrigada de 750 km². A lo largo de su curso se construyeron tres represas con sus correspondientes centrales hidroeléctricas. La represa Agua del Toro, cuyo principal uso es la generación de energía y la provisión de agua para riego, posee una capacidad máxima de 325 hm³ y fue inaugurada en 1982. Aguas abajo se encuentra la presa Los Reyunos, la cual comenzó sus actividades durante 1983 y posee una capacidad de 267 hm³. A continuación se encuentra el embalse El Tigre, con una capacidad de 7 hm³, cuyo principal uso es mantener el nivel de restitución de la central Los Reyunos al mantener la cota de su propio embalse.

La cuenca del río Atuel tiene una extensión de más de 29.000 km², y más de 58.000 habitantes. El río Atuel junto con el Diamante abastecen el oasis Sur de la provincia de Mendoza. Posee una superficie irrigada 1108 km² y a lo largo de su curso presenta un sistema de embalses y centrales hidroeléctricas comúnmente denominados “Los Nihuales” cuyos principales usos son generación hidroeléctrica, la regulación de caudales para riego y contención de avenidas. Estos embalses son El Nihuil (Nihuil I),

puesto en operación en 1947 con una capacidad máxima de 259 hm³; Aisol (Nihuil II) y Tierras Blancas (Nihuil III), con una capacidad inferior a 1 hm³; y Valle Grande (Nihuil IV), puesto en operación en 1965 con una capacidad de 168 hm³.

Al sur de la provincia de Mendoza y sin grandes embalses sobre sus ríos se encuentran las cuencas Laguna Llanquanelo y Colorado. La cuenca de Laguna Llanquanelo posee una superficie de más de 10.000 km², cuyos principales cursos de agua, los ríos Pincheira y Malargüe, son utilizados para la irrigación de un pequeño oasis cercano a la localidad de Malargüe. La cuenca del río Colorado se extiende en un área de aproximadamente 48.000 km² atravesando las provincias de Mendoza, Neuquén, La Pampa, Río Negro y Buenos Aires hasta desembocar en el océano Atlántico. El río Colorado nace de la confluencia de los ríos Grande y Barrancas en la provincia de Mendoza, en su curso en dicha provincia actualmente no presenta embalses. Está proyectada la construcción del embalse Portezuelo del Viento, el cual de concretarse el proyecto sería el más grande de la región de Cuyo, ubicado sobre el río Grande cerca de los 36°S. Dado su carácter transfronterizo existe preocupación en los organismos de gestión del agua de las provincias ubicadas aguas abajo, ya que se exponen a enfrentar una merma aún mayor en los caudales.

3. Materiales y métodos

Se utilizaron registros diarios de caudales observados en 15 estaciones de aforo ubicadas sobre los principales ríos de la región de Cuyo, pertenecientes al sistema del río Colorado. La **Figura 1** muestra la región de estudio, con la ubicación de los ríos analizados y las estaciones de aforo, las cuales se ubican en un gradiente latitudinal entre 31°S y 37°S. Las observaciones fueron obtenidas a través del Sistema Nacional de Información Hidrológica (SNIH, <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>) y abarcan el período comprendido entre julio de 1971 y junio de 2020. Esta base de datos fue previamente utilizada para el análisis de las variaciones medias y extremas de los caudales en la región de Cuyo (Lauro et al., 2016; Rivera et al., 2017, a; Rivera et al., 2017, b; Rivera y Penalba, 2018; Lauro et al., 2019; Rivera et al., 2021), y fue sometida a exhaustivos procesos de control de calidad, consistencia y homogeneidad, los cuales se detallan en las mencionadas publicaciones. Los registros utilizados no poseen datos faltantes, dado que los baches en las series

temporales fueron rellenados con el uso de procedimientos que dependen de la extensión temporal del período faltante, las condiciones hídricas regionales al momento de la ocurrencia del período de datos faltantes y la disponibilidad de series de referencia para la reconstrucción de las series temporales. Estos procedimientos se detallan en Vich et al. (2014) y Rivera et al. (2017, a), entre otros trabajos.

Diversas métricas para el análisis de caudales bajos fueron calculadas a partir de las series temporales seleccionadas. Los índices, comúnmente utilizados para la caracterización de sequías hidrológicas, se basan en el método de umbral diario variable, el cual considera diversos niveles de truncamiento derivados de la curva de duración de caudal (Zelenhasić y Salvai, 1987). Mediante estos índices, un evento de sequía comienza cuando la variable hidrológica es inferior al valor umbral, y finaliza cuando iguala o supera este nivel (Sutanto y Van Loon, 2021). Para esta investigación se utilizaron umbrales basados en el caudal igualado o excedido el 50% (Q50, caudal mediano), 60% (Q60), 70% (Q70), 80% (Q80) y 90% (Q90) de los registros de la serie temporal. Asimismo, se complementó el análisis utilizando el caudal medio (Qmed) teniendo en cuenta que posee una interpretación más directa. Umbrales similares fueron usados en investigaciones previas en Canadá (Sharma y Panu, 2012); China (Sun et al., 2019); Dinamarca (Tallaksen et al., 1997); Irán (Byzedi et al., 2014); Estados Unidos (Zhao et al., 2021); sur de África (Tate y Freeman, 2000); Europa (Hisdal et al., 2001; Margariti et al., 2019) y a nivel global (Fleig et al., 2006; Van Loon et al., 2014). El análisis de condiciones de déficit en diversas cuencas de Argentina destaca el uso de los umbrales Q70, Q80 y Q90 para clasificar sequías hidrológicas moderadas, severas y extremas (Rivera et al., 2017,a; Rivera et al., 2018; Rivera et al., 2021). Previo al cálculo de estos percentiles, se suavizaron las series temporales mediante la aplicación de un promedio móvil de 7 días, lo cual permite eliminar eventos de sequía menores y concatenar eventos dependientes entre sí (Beyene et al., 2014). Asimismo, se removieron los datos correspondientes a los días 29 de febrero. Un detalle de la metodología utilizada y su formulación puede encontrarse en Rivera et al. (2021). A modo de ejemplo, la **Figura 2** muestra el funcionamiento del método utilizando datos de caudal diario del río Mendoza y el umbral Q70 para la identificación de períodos de sequía hidrológica durante los años hidrológicos 2010/11 a 2012/13. Se observa que el caudal estuvo por debajo del umbral durante

gran parte del período seleccionado, en particular durante el verano de 2010/11, momento en el que se registró un déficit significativo. Además, se destaca la presencia de variabilidad en escala intra-estacional que modula el caudal durante el verano de 2012/13, la cual genera recuperaciones parciales en los niveles de agua del río Mendoza.

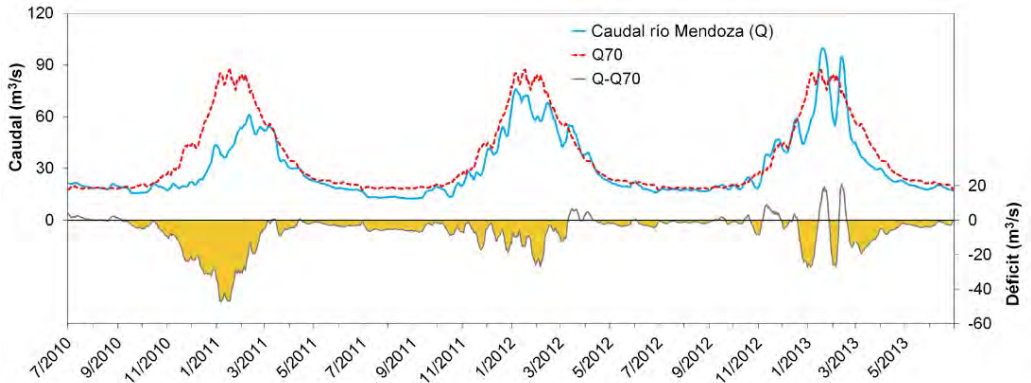


Figura 2. Comparación de los registros de caudal diario en el río Mendoza (Q, línea azul) durante el período 2010/11 a 2012/13 con el nivel umbral Q70 (línea de trazos roja) calculado a partir del registro completo (1971/72-2019/20). La serie temporal de caudales fue suavizada con un promedio móvil de 7 días previo al cálculo del Q70. El déficit se obtiene como la diferencia entre el caudal y el umbral seleccionado ($Q - Q70$) para los períodos en los cuales $Q < Q70$ (marcados con color naranja).

4. Resultados

A fin de cuantificar la severidad de la sequía hidrológica durante el período 2010/11-2019/20 en la región de Cuyo, se obtuvo la sumatoria de las diferencias diarias entre el caudal observado y los umbrales seleccionados. Este caudal deficitario acumulado fue transformado posteriormente a volumen. En el caso de los ríos que poseen embalses a lo largo de su curso, el volumen fue luego ponderado por la capacidad máxima de los mismos, lo cual permite obtener una medida representativa y fácilmente interpretable de las condiciones de severidad de la sequía hidrológica para el monitoreo y la toma de decisiones vinculadas al agua.

La **Tabla 1** muestra el déficit acumulado para cada uno de los umbrales seleccionados en los 15 ríos de la región de Cuyo. Se observa que, salvo el río San Juan, todos los ríos registraron déficit respecto al umbral Q70. Esto indica que, a lo largo de la última década, los caudales de los ríos de los Andes Centrales presentaron niveles que son superados el 70% del tiempo. Los déficits más severos se observan en el río Tunuyán y los ríos ubicados al sur del río Diamante, los cuales presentaron déficits por debajo del umbral Q80. El caso más severo se observa para el río Colorado, donde se observó déficit en el caudal considerando el umbral de mayor severidad (Q90). Esto puede asociarse a la propagación del déficit conjunto del caudal de los ríos Grande y Barrancas. La **Tabla 1** incluye además la descarga media anual para los ríos analizados, de forma tal de poner en contexto los déficits observados a lo largo de la última década.

La **Tabla 2** muestra el déficit acumulado durante el período de sequía hidrológica 2010/11-2019/20 en las cuencas de los ríos San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel que considera el índice Qmed, expresado en términos de cantidad de embalses por cuenca. En el caso de las cuencas que tienen dos o más embalses, esta proporción se calculó en base al volumen total de todos los reservorios. La cuenca del río San Juan posee el mayor volumen embalsado de la región de Cuyo, con una capacidad total de 1505 hm³ (**Tabla 2**).

El déficit acumulado en el río San Juan entre 2010/11 y 2019/20 alcanzó 7106,4 hm³, equivalente a casi 5 veces la capacidad combinada de los embalses Punta Negra, Ullúm y Los Caracoles. Se observa que el déficit acumulado a lo largo de la última década en el río Mendoza, en base al umbral Qmed, alcanzó 4263,2 hm³ (**Tabla 1**), lo cual resulta equivalente al volumen de aproximadamente 11 embalses Potrerillos (**Tabla 2**).

Cuenca	Río	Estación de aforo	Descarga media anual (hm ³)	Déficit Omed (hm ³)	Déficit Q50 (hm ³)	Déficit Q60 (hm ³)	Déficit Q70 (hm ³)	Déficit Q80 (hm ³)	Déficit Q90 (hm ³)
San Juan	de los Patos	Álvarez Condarco	609,3	2799,7	2026,7	1079,9	135,6	0	0
	San Juan	Km 101	1800,5	7106,4	4023,8	1697,9	0	0	0
Mendoza	Cuevas	Punta de Vacas	215,1	947,5	727,7	456,8	201,2	0	0
	Vacas	Punta de Vacas	141,5	572,6	397,0	229,5	86,8	0	0
	Tupungato	Punta de Vacas	752,1	2159,1	1658,5	1080,4	348,6	0	0
	Mendoza	Guido	1483,1	4263,2	3150,2	1934,7	664,8	0	0
Tunuyán	Tunuyán	Valle de Uco	878,2	3191,7	2587,4	1862,3	1123,8	308,4	0
Diamante	Diamante	La Jaula	1001,7	3562,3	2828,6	1867,1	797,9	0	0
Atuel	Salado	Cañada Ancha	321,9	1702,3	1222,9	852,3	483,6	132,1	0
	Atuel	La Angostura	1121,7	3225,9	2959,3	2132,1	1262,3	420,1	0
Laguna Llacanelo	Pincheira	Pincheira	156,3	785,8	684,2	495,9	322,9	110,5	0
Colorado	Poti Malal	Gendarmería	219,3	1309,0	978,3	612,3	344,9	78,4	0
	Grande	La Gotera	3162,0	14748,1	11860,6	7939,1	4580,7	1850,2	0
	Barrancas	Barrancas	1140,1	4002,0	3267,5	2076,8	1101,2	124,3	0
	Colorado	Buta Ranquil	4500,6	19328,7	15632,5	10938,3	5857,8	1578,6	61,8

Tabla 1. Déficit acumulado durante el período de sequía hidrológica reciente (2010/11-2019/20) en los principales ríos de la región de Cuyo.

Cuenca	Embalse	Año de inicio de operación	Capacidad (hm ³)	Déficit estandarizado
San Juan	Los Caracoles	2008	565 ^a	4,7
	Punta Negra	2015	500 ^a	
	Ullúm	1980	440 ^a	
Mendoza	Potrerillos	2001	393 ^b	10,8
Tunuyán	El Carrizal	1971	322 ^b	9,9
Diamante	Agua del Toro	1982	325 ^c	6,0
	Los Reyunos	1983	267 ^c	
Atuel	El Nihuil	1948	259 ^c	8,3
	Valle Grande	1965	168 ^c	

^aDatos obtenidos de EPSE (<https://www.epse.com.ar/>)

^bDatos obtenidos de DGI (<http://www.irrigacion.gov.ar/dgi/>)

^cDatos obtenidos de ORSEP (<https://www.argentina.gob.ar/orsep>)

Tabla 2. Características de los embalses existentes en la región de Cuyo y déficit estandarizado durante el período 2010/11-2019/20. El déficit estandarizado corresponde al déficit acumulado en base al umbral Qmed (ver Tabla 2) ponderado por la capacidad de los embalses de cada cuenca, lo cual permite expresar el déficit en términos de la cantidad de embalses que se perdieron por la sequía hidrológica en la región.

Este resultado es particularmente relevante si consideramos que el suministro de agua potable para más de un millón de personas y gran parte del agua para la irrigación del oasis norte depende del caudal del río Mendoza (**Figura 1**). Las condiciones de sequía hidrológica observadas en el río Tunuyán presentaron un déficit acumulado que equivale a casi 10 veces la capacidad del embalse El Carrizal. En tanto, el déficit acumulado en el río Diamante alcanzó 3562,3 hm³, es decir, el equivalente a 6 veces el volumen de los embalses Agua del Toro y Los Reyunos. Dado que la presa El Tigre tiene una capacidad máxima que representa poco más del 1% del volumen máximo de los embalses Agua del Toro y Los Reyunos, la misma se dejó de lado para el análisis. No obstante, el resultado no se ve modificado si consideramos su inclusión (no mostrado). En el caso del río Atuel, las condiciones de sequía hidrológica totalizaron un volumen deficitario de más de 8 veces la capacidad de los embalses Valle Grande y El Nihuil. Al igual que en el caso del río Diamante, se

dejaron de lado los embalses Aisol y Tierras Blancas por poseer una capacidad de almacenamiento mínimo respecto a la de los embalses Valle Grande y El Nihuil.

A fin de analizar los cambios temporales en la severidad de la sequía hidrológica, la **Figura 3** muestra la evolución temporal del déficit acumulado a lo largo del período 1971/72-2019/20, considerando los umbrales basados en los percentiles 50 a 90 para los ríos seleccionados en la **Tabla 2**. Se destaca no solo la consistencia temporal del período de sequía hidrológica reciente, inusual en el contexto de los últimos casi 50 años, sino además el nivel extremo de severidad registrado durante el ciclo hidrológico 2019/20, que supera en todos los ríos analizados y para todos los umbrales de severidad eventos previos como los registrados en el año 1976/77 o 1996/97. Asimismo, la **Figura 3** permite identificar la presencia de variabilidad en escala interanual dentro de la década de sequía reciente, asociada principalmente a una recuperación de los caudales durante los años 2015/16 y 2016/17 como consecuencia de nevadas cercanas a los valores normales, asociadas al evento El Niño 2015/16 (Martínez et al., 2017). Este período de sequía hidrológica reciente es parcialmente atribuible a diversos factores atmosféricos y oceánicos: una persistencia de condiciones La Niña o incluso de temperaturas superficiales del Océano Pacífico tropical anómalamente frías que no llegan al umbral de definición de eventos La Niña (Rivera et al., 2017, a); la ubicación del anticiclón semipermanente del Océano Pacífico sur desplazado hacia el sur respecto a su posición climatológica y con mayores valores de presión (Rivera y Arnould, 2020; Rivera et al., 2020); y una región de anomalías cálidas en la región extratropical del Océano Pacífico al este de Nueva Zelanda (Garreaud et al., 2021).

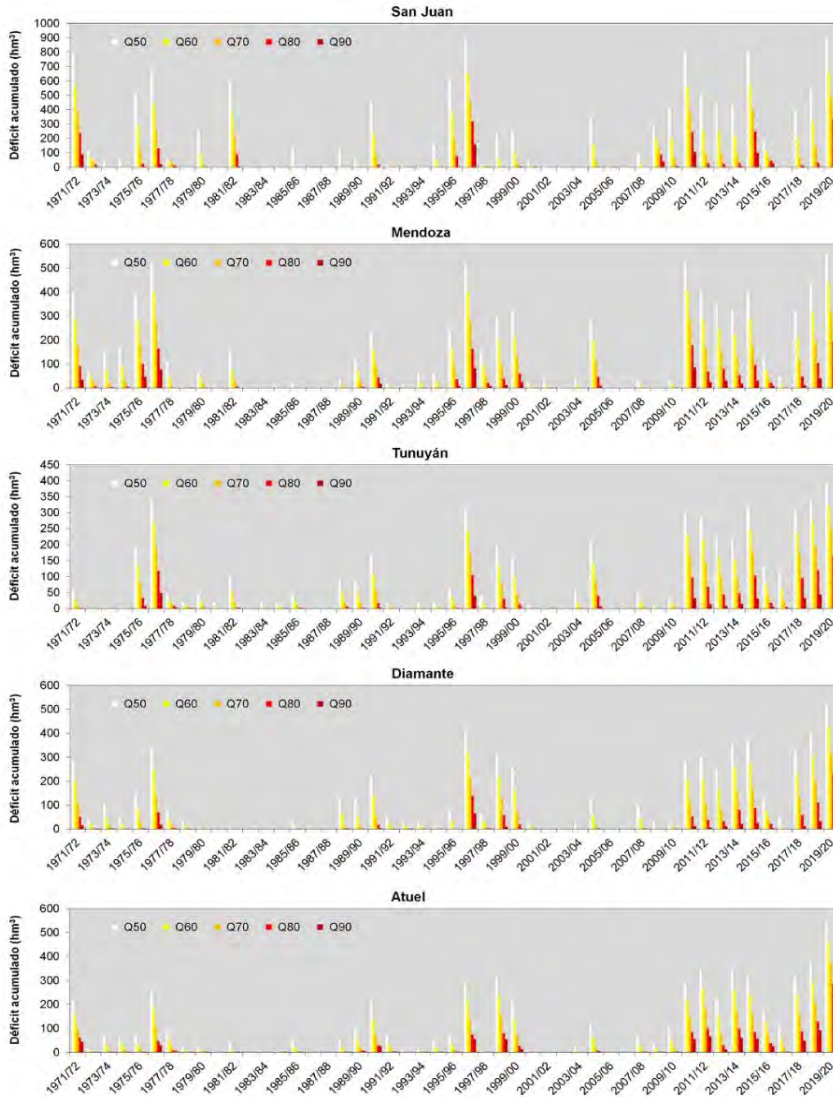


Figura 3. Evolución temporal del déficit anual acumulado registrado en cinco ríos de la región de Cuyo, estimado a partir de diversos umbrales para el período 1971/72-2019/20.

5. Discusión

El manejo de los recursos hídricos en regiones áridas y semi-áridas como el Centro Oeste de Argentina es un desafío para los organismos de gestión del agua, en particular durante períodos en los que la acumulación de nieve se encuentra por debajo de lo normal, como el registrado en el período 2010/11-2019/20 (Masiokas et al., 2020). Esto genera condiciones de sequía hidrológica que afectan no solo la descarga de los principales ríos de la región, sino además el volumen de agua embalsado, con la consecuente disminución de la disponibilidad de agua para consumo humano y para la irrigación de los oasis productivos (Rivera et al., 2021). Durante este período de sequía, tanto el aporte de los glaciares como el del agua subterránea jugaron un papel fundamental para sostener el caudal de los ríos (Crespo et al., 2020). La merma en el acumulado de nieve pudo haber impactado negativamente en la recarga de agua subterránea (Massone et al., 2016) y sin dudas afectó el balance de masa de los cuerpos de hielo en los Andes Centrales (Dussaillant et al., 2019). No obstante, como indican Crespo et al. (2020), es necesario profundizar en el estudio de la interacción entre las componentes superficiales y sub-superficiales del ciclo hidrológico regional, considerando además mediciones más extensas y una mayor cantidad de cuencas para el estudio. Al respecto, una investigación reciente que considera cuencas de Canadá, Noruega y los Alpes, utilizando registros de los últimos 50 años, mostró un comportamiento heterogéneo en términos de la contribución de los glaciares a los caudales en períodos de sequía y elevadas temperaturas (Van Tiel et al., 2021). A fin de profundizar en el estudio de la contribución de las distintas componentes del ciclo hidrológico durante períodos de sequía, el uso de modelos hidrológicos como el recientemente desarrollado HBV.IANIGLA (Toum et al., 2021) podría permitir avanzar en el conocimiento de la hidrología regional. Este conocimiento es sumamente necesario si consideramos la disminución proyectada para las próximas décadas en las precipitaciones sobre los Andes Centrales, con el consecuente impacto en la disponibilidad de agua dulce para la región de Cuyo (Almazroui et al., 2021; Rivera et al., 2020).

Para la definición de condiciones de sequía hidrológica, en esta investigación se utilizó el método de umbral basado en diversos percentiles de excedencia (i.e. Qmed a Q90). El caudal medio (Qmed) representa un valor umbral comprensible tanto por

encargados del manejo de los recursos hídricos como por académicos y público en general, ya que el mismo permite representar el déficit respecto a las condiciones medias de caudal. La estandarización de este déficit con los volúmenes de embalses permite cuantificar el volumen deficitario de los recursos hídricos superficiales en términos equivalentes a la capacidad máxima de reserva de agua de los principales embalses de las cuencas de la región de Cuyo. En algunas cuencas de Filipinas se emplearon índices normalizados de embalses para la caracterización de sequías hidrológicas y socioeconómicas (Gusye et al. 2015). Asimismo, diversos estudios a nivel mundial han analizado las variaciones de los volúmenes deficitarios utilizando la metodología considerada en esta investigación (Clausen y Pearson, 1995; Tallaksen et al., 1997; Caillouet et al., 2017; Van Loon y Laaha, 2015; Van Tiel et al., 2018).

Históricamente, la construcción de embalses y reservorios sirvió como estrategia para la regulación del suministro natural de agua para una amplia variedad de necesidades humanas y ambientales (Ehsani et al., 2017), que actuó como una herramienta para la mitigación de los impactos de la sequía. Desde principios del siglo XXI se han construido tres nuevos embalses en la región, los cuales incrementan la capacidad para hacer frente a las condiciones de sequía hidrológica imperantes, sobre todo en la cuenca del río San Juan (**Tabla 2**). No obstante, los embalses generan alteraciones en los regímenes hidrológicos, afectando a la biodiversidad y los procesos ecológicos (Di Baldassarre et al., 2021), así como también el desarrollo de actividades humanas como la ganadería en zonas áridas (Montaña et al., 2016). Con lo cual, a pesar de tener claros beneficios, todavía existe cierta controversia a nivel mundial respecto a estas infraestructuras (Boyé y de Vivo, 2016; Di Baldassarre et al., 2018). Si bien no es objeto de este estudio profundizar en estos aspectos, queda claro que los embalses ubicados sobre los principales ríos de la región de Cuyo contribuyeron a mitigar el impacto de la sequía hidrológica que se registra desde el año 2010. Frente a las proyección de incrementos de frecuencia e intensidad de eventos de sequías en la región (Almazroui et al., 2021; Rivera et al., 2020) se requieren diversas estrategias que permitan mitigar los impactos y adaptarse a esta nueva normalidad, a fin de mejorar la oferta de agua y trabajar diversos aspectos relacionados a las demandas del recurso.

CONCLUSIONES

En esta investigación se realiza una cuantificación del déficit en los caudales superficiales de los principales ríos de la región de Cuyo, asociado a la extraordinaria sequía hidrológica que tiene lugar desde el año 2010. Estos déficits presentan valores récord en el contexto de los últimos 50 años, en particular durante el año hidrológico 2019/20. Las diferencias regionales en los valores de déficit permiten establecer que la mayor severidad se observó en las cuencas de los ríos Atuel y Colorado, las cuales en promedio registraron caudales por debajo del umbral Q80 durante el período 2010/11-2019/20. A partir de la estandarización del déficit por el volumen de los embalses de la región, se obtuvo una medida de fácil interpretación y aplicación para el monitoreo y la toma de decisiones en relación al impacto de la sequía hidrológica en la disponibilidad de agua dulce. Esto permite visualizar la disminución del volumen de agua en cada cuenca durante el evento de sequía hidrológica registrado en la última década. Teniendo en cuenta que el invierno de 2021 registra una escasa acumulación de nieve sobre la Cordillera de los Andes en las nacientes de los principales ríos de la región, siendo en algunas cuencas inferior al acumulado observado durante el invierno de 2019, es esperable que el déficit hídrico se prolongue, incluso con niveles de severidad que podrían marcar un nuevo récord. Esto requerirá la optimización del manejo de los recursos hídricos regionales que contemple las características de cada cuenca en particular. Además, la creación de planes de gestión de la sequía debe elaborarse dentro de un marco institucional que permita una interacción beneficiosa entre el sector científico y los actores encargados de la toma de decisiones. Esto permitirá garantizar la seguridad hídrica para las comunidades locales y para las necesidades ambientales, muchas veces poco consideradas en la gestión hídrica de la región. El seguimiento de estos eventos extremos en escalas diaria y mensual, y el desarrollo de sistemas de alerta temprana pueden proporcionar la información necesaria para tomar decisiones proactivas sobre la gestión de los recursos hídricos en el Centro Oeste de Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina por la provisión de los datos de caudal utilizados. El trabajo fue realizado con aportes de los proyectos de investigación PICT-2016-0431 y PICT-2019-2019-03430, financiados por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

BIBLIOGRAFÍA

- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M.N., Rashid, I.U., Shahzad, K., Abid, M.A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M.S. Sörensson, A.A., Arias, P.A., Alves, L., Tippett, M.K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reyes, F.J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., Rivera, J.A., Ehsan, M.A., Martínez-Castro, D., Muñoz, A.G., Ali, M.A., Coppola, E. & Sylla, M.B. (2021). Assessment of CMIP6 models performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5, 155-183. doi: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>
- Beyene, B. S., Van Loon, A. F., Van Lanen, H. A. J. & Torfs, P. J. J. F. (2014). Investigation of variable threshold level approaches for hydrological drought identification. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 11, 12765–12797. doi: <https://doi.org/10.5194/hessd-11-12765-2014>
- Boyé, H. & de Vivo, M. (2016). The environmental and social acceptability of dams. *Field Actions Science Reports*, 14, 32-37.
- Byzedi, M., Saghafian, B., Mohammadi, K. & Siosemarde, M. (2014). Regional analysis of streamflow drought: a case study in southwestern Iran. *Environ. Earth Sci.* 71, 2955–2972. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2674-7>
- Cabré, F. & Nuñez, M. (2020). Impacts of climate change on viticulture in Argentina. *Reg. Environ. Change*, 20, 12. doi: [10.1007/s10113-020-01607-8](https://doi.org/10.1007/s10113-020-01607-8)
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Devers, A. & Graff, B. (2017). Ensemble reconstruction of spatio-temporal extreme low-flow events in France since 1871. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 2923–2951. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-21-2923-2017>
- Clausen, B. & Pearson, C. P. (1995). Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology* 173, 111-130. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02713-Y](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02713-Y)
- Crespo, S. A., Fernandoy, F., Cara, L., Klarian, S. & Lavergne, C. (2020). First snow, glacier and groundwater contribution quantification in the upper Mendoza River basin using stable water isotopes. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56(5-6), 566-585. doi: <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1797713>
- Di Baldassarre, G., Mazzoleni, M. & Rusca, M. (2021). The legacy of large dams in the United States. *Ambio*. doi: <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01533-x>
- Di Baldassarre, G., Wanders, N., AghaKouchak, A., Kuil, L., Rangecroft, S., Veldkamp, T. I. E., Garcia, M., van Oel, P. R., Breinl, K. & Van Loon, A. F. (2018). Water shortages worsened by reservoir effects. *Nature Sustainability*, 1, 617-622. doi: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0159-0>
- Dracup, J. A., Lee, K. S. & Paulson, E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16(2), 297-302. doi: <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297>

- 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. *Nat. Geosci.*, 12, 802-808. doi: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Ehsani, N., Vörösmarty, C. J., Fekete, B. M. & Stakhiv, E. Z. (2017). Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, 555, 435-446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.008>
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H. & Demuth, S. (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 535–552. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-10-535-2006>
- Garreaud, R. D., Clem, K. & Veloso, J. V. (2021). The South Pacific Pressure Trend Dipole and the Southern Blob. *Journal of Climate* 34, 7661-7676. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0886.1>
- Gusyeve, M. A., Hasegawa, A., Magome, J., Kuribayashi, D., Sawano, H. & Lee, S. (2015). Drought Assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. Part 1: A Role of Dam Infrastructure in Historical Droughts. Actas del 21º Congreso Internacional sobre Modelado y Simulación (MODSIM 2015), Broadbeach, Queensland (Australia).
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L. M. & Demuth, S. (2001). Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *Int. J. Climatol.* 21, 317-333. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.619>
- Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radic, V. & Slangen, A. (2019). GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, 65, 453-467. doi: <https://doi.org/10.1017/jog.2019.22>
- Lauro, C., Vich, A. I. & Moreiras, S. M. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indices in western rivers of Argentina. *Hydrol. Sci. J.*, 64(5), 607-619. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>
- Lauro, C., Vich, A. & Moreiras, S. M. (2016). Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *Geoacta*, 40(2), 28-51.
- Margariti, J., Rangelcroft, S., Parry, S., Wendt, D. E. & Van Loon, A. F. (2019). Anthropogenic activities alter drought termination. *Elem. Sci. Anth.* 7: 27. doi: <https://doi.org/10.1525/elementa.365>
- Martínez, R., Zambrano, E., Nieto, J. J., Hernández, J. & Costa, F. (2017). Evolución, vulnerabilidad e impactos económicos y sociales de El Niño 2015-2016 en América Latina. *Investigaciones Geográficas*, 68, 65-78. doi: <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.68.04>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussailant, I. & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Front. Earth Sci.* 8:99. doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>

- Massone, H., Martinez, D., Vich, A., Quiroz Londoño, M., Trombotto, D. & Grondona, S. (2016). Snowmelt contribution to the sustainability of the irrigated Mendoza's Oasis, Argentina: an isotope study. *Environ. Earth Sci.*, 75, 520. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5141-9>
- Montaña, E., Diaz, H. P. & Hurlbert, M. (2016). Development, local livelihoods, and vulnerabilities to global environmental change in the South American Dry Andes. *Reg. Environ. Change*, 16, 2215-2228. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0888-9>
- Rivera, J. A., Otta, S., Lauro, C. & Zazulie, N. (2021). A decade of hydrological drought in Central-Western Argentina. *Front. Water*, 3, 640544. doi: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544>
- Rivera, J. A., Naranjo Tamayo, E. & Viale, M. (2020). Water resources change in Central-Western Argentina under the Paris Agreement warming targets. *Front. Clim.*, 2, 587126. doi: <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.587126>
- Rivera, J. A. & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: climatic features and long-term trends (1901-2014). *Atmospheric Research* 241, 104953. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953>
- Rivera J. A. & Penalba O. C. (2018). Distribución de probabilidades de los caudales mensuales en las regiones de Cuyo y Patagonia (Argentina). Aplicación al monitoreo de sequías hidrológicas. *Meteorologica*, 43(2), 25-46.
- Rivera J. A., Araneo D. C., Penalba O. C. & Villalba R. (2018). Regional aspects of streamflow droughts in the Andean rivers of Patagonia, Argentina. Links with large-scale climatic oscillations. *Hydrology Research* 49(1), 134-149. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2017.207>
- Rivera J. A., Araneo D. C. & Penalba O. C. (2017, a). Threshold level approach for streamflow droughts analysis in the Central Andes of Argentina: A climatological assessment. *Hydrological Sciences Journal*, 62(12), 1949-1964. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1367095>
- Rivera J. A., Penalba O. C., Villalba R. & Araneo D. C. (2017, b). Spatio-temporal patterns of the 2010-2015 extreme hydrological drought across the Central Andes, Argentina. *Water*, 9(9), 652. doi: <https://doi.org/10.3390/w9090652>
- Sharma, T. C. & Panu, U. S. (2012). Prediction of hydrological drought durations based on Markov chains: case of the Canadian prairies. *Hydrological Sciences Journal* 57(4), 705-722. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672741>
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, 147-186. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., Christensen, O. B., Coppola, E., Evans, J., Geyer, B., Giorgi, F., Hadjinicolaou, P., Jacob, D., Katzfey, J., Koenigk, T., Laprise, R., Lennard, C. H., Levent Kurnaz, M., Li, D., Llopart, M., McCormick, N., Naumann, G., Nikulin, G., Ozturk, T.,

- Panitz, H.-J., Porfirio da Rocha, R., Rockel, B., Solman, S. A., Syktus, J., Tangang, F., Teichmann, C., Vautard, R., Vogt, J. V., Winger, K., Zittis, G. & Dosio, A. (2020). Future global meteorological drought hotspots. A study based on CORDEX data. *J. Climate*, 33, 3635-3661. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0084.1>
- Sun, P., Zhang, Q., Yao, R. & Wen, Q. (2019). Hydrological Drought Regimes of the Huai River Basin, China: Probabilistic Behavior, Causes and Implications. *Water* 11(11):2390. doi: <https://doi.org/10.3390/w11112390>
- Sutanto, S. J. & Van Lanen, H. A. J. (2021). Streamflow drought: implication of drought definitions and its application for drought forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 3991-4023. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-25-3991-2021>
- Tallaksen, L. M., Madsen, H. & Clausen, B. (1997). On the definition and modelling of stream-flow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal* 42(1), 15-33. doi: <https://doi.org/10.1080/02626669709492003>
- Tate, E. L. & Freeman, S. N. (2000). Three modelling approaches for seasonal streamflow droughts in southern Africa: the use of censored data. *Hydrological Sciences Journal* 45(1), 27-42. doi: <https://doi.org/10.1080/02626660009492304>
- Toum, E., Masiokas, M. H., Villalba, R., Pitte, P. & Ruiz, L. (2021). The HBV.IANIGLA Hydrological Model. *The R Journal*. doi: <https://doi.org/10.32614/RJ-2021-059>
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359-392. doi: <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Van Loon, A. F. & Laaha, G. (2015). Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology* 526, 3-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>
- Van Loon, A. F., Tijdeman, E., Wanders, N., Van Lanen, H. A. J., Teuling, A. J. & Uijlenhoet, R. (2014). How climate seasonality modifies drought duration and deficit. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 4640-4656. doi: <https://doi.org/10.1002/2013JD020383>
- Van Tiel, M., Van Loon, A. F., Seibert, J. & Stahl, K. (2021). Hydrological response to warm and dry weather: do glaciers compensate? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 3245-3265. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-25-3245-2021>
- Van Tiel, M., Teuling, A. J., Wanders, N., Vis, M. J. P., Stahl, K. & Van Loon, A. F. (2018). The role of glacier changes and threshold definition in the characterisation of future streamflow droughts in glacierised catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 463-485. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-22-463-2018>
- Vich, A. I. J., Norte, F. A. & Lauro, C. (2014). Análisis regional de frecuencias de caudales de ríos pertenecientes a cuencas con nacientes en la Cordillera de los Andes. *Meteorologica*, 39(1), 3-26.

Villamayor, J., Khodri, M., Villalba, R. & Daux, V. (2021). Causes of the long-term variability of southwestern South America precipitation in the IPSL-CM6A-LR model. *Clim. Dyn.* doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05811-y>

Zazulie, N., Rusticucci, M. & Raga, G. B. (2018). Regional climate of the Subtropical Central Andes using high-resolution CMIP5 models. Part II: future projections for the twenty-first century. *Clim. Dyn.*, 51, 2913-2925. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4056-4>

Zelenhasić, E. & Salvai, A. (1987). A method of streamflow drought analysis. *Water Resour. Res.*, 23(1), 156-168. doi: <https://doi.org/10.1029/WR023i001p00156>

Zhao, W., Guan, X., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, L. & Mamer, E. A. (2021). Development of flow-duration-frequency curves for episodic low streamflow. *Advances in Water Resources* 156, 104021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104021>

LOS AUTORES

Juan Rivera es Licenciado y Doctor en Ciencias de la Atmósfera y los Océanos por la Universidad de Buenos Aires. Actualmente es Profesor Titular de la cátedra Climatología en las carreras de Ciencias Ambientales y Ciencias de la Atmósfera y Meteorología Aplicada, Universidad Nacional de Los Comechingones. Es Investigador Adjunto del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Su actividad científica mayormente se ha desarrollado en el ámbito de la investigación de extremos climáticos, en particular asociados a sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas, así como también de la investigación del cambio climático regional. Cuenta con numerosas publicaciones en revistas científicas nacionales e internacionales y es autor principal del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

Carolina Lauro es Ingeniera en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Cuyo. Doctora en Ingeniería de la Universidad Nacional de Rosario. Es Investigadora asistente de CONICET y trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación se refieren a Recursos hídricos superficiales. Regionalización de variables hidrológicas extremas: sequías, inundaciones. Variabilidad hidrológica y relación con el cambio climático.


Sebastián A. Otta es Ingeniero en Recursos Naturales Renovables por la Universidad Nacional de Cuyo y Diplomado Universitario en Gestión Territorial por la Universidad Maza. Se ha desempeñado en el ámbito de la consultoría ambiental de proyectos públicos y privados. Actualmente es becario doctoral de CONICET en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales y profesor del curso de Contaminación de Suelos, en la Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Cuyo. Es estudiante del Doctorado en Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Buenos Aires y su actividad científica se enfoca en el impacto de la variabilidad hidro-climática y los cambios de uso de la tierra en el balance hídrico y capacidad productiva de la región de Cuyo.

Recursos hídricos superficiales de la vertiente oriental de los Andes Centrales (28°-37°S) en contexto de variabilidad hidroclimática

Surface water resources in the eastern slope of the Central Andes (28°-37°S) in a context of hydroclimatic variability

 <https://doi.org/10.48162/rev.40.007>


Carolina Lauro  orcid.org/0000-0001-7150-3885

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 clauro@mendoza-conicet.gob.ar

Alberto Ismael Juan Vich  orcid.org/0000-0002-0477-2476

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina
 aijvich@mendoza-conicet.gob.ar


Sebastián Alfredo Otta  orcid.org/0000-0003-4189-9406

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 sotta@mendoza-conicet.gob.ar


Stella Maris Moreiras  orcid.org/0000-0001-6462-6684

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina

Emilce Liliana Belén Vaccarino Pascuali  orcid.org/0000-0003-0443-9961

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 evaccarino@mendoza-conicet.gob.ar

Luis Bernardo Bastidas Mejías  orcid.org/0000-0002-8570-9734

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 lbastidas@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El estudio de la variabilidad hidroclimática de una región contribuye a mejorar la seguridad hídrica de las comunidades ya que brinda información para la gestión de los recursos hídricos. El objetivo es identificar los principales modos de variabilidad y la relación entre series temporales de precipitación, temperatura y caudales medios anuales para los últimos 60 años de algunas cuencas de la región de Cuyo. Se realizaron pruebas de tendencias, saltos y periodicidades. Los resultados, en líneas generales, muestran que las precipitaciones y los caudales tienden a disminuir y presentan ciclos significativos de alta y baja frecuencia. Por el contrario, la temperatura muestra una tendencia creciente asociada a incrementos en la década del 80, los períodos con mayor intensidad son los que se presentan en escala interanual. Estos resultados brindan información para la comprensión de las relaciones entre los patrones de variabilidad hidroclimática y los intercambios entre los diversos componentes del ciclo hidrológico en el centro oeste argentino, lo que permite mejorar la toma de decisiones.

PALABRAS CLAVE: hidroclimatología, precipitaciones, temperatura, caudal, tendencias, saltos, periodicidades.

ABSTRACT

Explore the hydroclimatic variability of a region provides information for water resources management improving water security in the communities involved. The aim is to identify modes of variability and the relationship between time series of precipitation, temperature and annual mean flows for the last 60 years of some basins in the Cuyo region. Trend, jump and periodicity tests were carried out. The results, in general terms, show that rainfall and flows tend to decrease and present significant cycles of high and low frequency. On the contrary, the temperature shows an increasing trend associated with increases in the 80s, the periods with the greatest intensity are those presented on an inter-annual scale. These results provide information for understanding the relationships between the patterns of hydroclimatic variability and the exchanges between the various components of the hydrological cycle in Central-Western Argentina, which allows better decision-making.

KEYWORDS: hydroclimatology, precipitation, temperature, streamflow, trend, step change, periodicity.

INTRODUCCIÓN

Los cambios del clima en diversas escalas temporales repercuten en el ciclo hidrológico de los Andes Centrales. Los principales impactos descritos son: el retroceso de glaciares, la disminución de las precipitaciones nivas, cambios en el régimen de escurrimiento, cambios en la intensidad de eventos extremos, entre otros (Magrin et al., 2014). Ante estas evidencias, conocer la distribución temporal y espacial de los recursos hídricos y la cuantificación de los mismos resulta de vital importancia para la planificación a largo plazo.

Los cambios en los diversos componentes del ciclo hidrológico pueden alterar la disponibilidad hídrica para el desarrollo socio-económico de la región, comprometiendo su seguridad hídrica, entendida como la capacidad de las sociedades para lograr un manejo exitoso e integral de sus recursos y servicios hídricos (GWP, 2000).

Durante la última década las ciudades y oasis productivos de la región centro oeste de Argentina se encuentran en un contexto de crisis hídrica; producto de la escasez de precipitaciones nivas durante el período invernal (Rivera et al., 2021). Este fenómeno meteorológico se encuentra estrechamente relacionado con la variabilidad climática. El principal impulsor climático, que modula las precipitaciones invernales, es el fenómeno de El Niño/Oscilación del sur (ENSO, por su sigla en inglés; Compagnucci et al., 2000; Masiokas et al., 2006; Rivera et al., 2017). La variabilidad interanual de los caudales está asociada al fenómeno ENSO, en tanto, la variabilidad interdecenal está asociada a la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO, por su sigla en inglés; Compagnucci y Araneo 2007; Masiokas et al., 2010; Rivera et al., 2014, 2017; Gonzalez-Reyes et al., 2017; Lauro et al., 2016, 2019). Además, se encuentra la influencia de las anomalías de circulación Antártica sobre variables asociadas a los caudales de los ríos andinos localizados al sur de los 37°S (Lauro et al., 2019).

Las variables hidroclimáticas se caracterizan por presentar periodicidades, es decir, la presencia de ciclos que se repiten con una determinada frecuencia en las series temporales. Dichos ciclos han sido identificados en series de caudales, precipitación, temperatura, entre otras (Rajagopalan y Lall, 1998; Rao y Hamed, 2003). Los mismos representan la influencia de fenómenos naturales como los ciclos solares, el ENSO u oscilaciones bienales. Algunos estudios sugieren la relación entre los ciclos solares y

el escurrimiento debido a que se encontraron oscilaciones entre 11-13 años en los ríos San Juan, Atuel y Colorado. En tanto, la oscilación de 4-6 años fue asociada a eventos ENSO (Labat, 2008; Mauas et al., 2011; Compagnucci et al., 2013). En el río Atuel la señal de ENSO se observa en variabilidad interanual en las bandas 4-7 años y la variabilidad de orden decenal centrada en 20 años aproximadamente (Compagnucci et al., 2000).

En la región de los Andes Centrales los pronósticos prevén una disminución de las precipitaciones níveas en la zona de la montaña (Rivera y Arnould, 2020), un aumento de la precipitación en el llano durante el período estival (Otta et al., 2020), y un aumento de la temperatura (Zazulie et al., 2017). En este contexto de variabilidad, sumado a las crisis hídricas registradas en los últimos años, resulta estratégico evaluar la oferta (superficial y subterránea) y la demanda a futuro de los oasis irrigados para llevar adelante planes de acción apunten que a la conservación de los recursos hídricos en cada una de las cuencas de la región centro oeste de Argentina.

El presente estudio se enfoca en la oferta hídrica superficial y tiene como objetivo identificar los principales modos de variabilidad y la relación entre las series temporales de precipitación, temperatura y caudal, desde escalas interanuales a decenales durante el período 1960-2018 en las cuencas que integran el sistema del río Colorado de la zona centro Oeste de Argentina. La finalidad del estudio es proporcionar información de utilidad en la gestión de los recursos hídricos en particular para cada cuenca analizada.

Área de estudio

La región de estudio se localiza en el centro-oeste de Argentina, conformada por las cuencas de los ríos San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel, Grande y Barrancas. Los cauces se extienden desde las altas cumbres de la cordillera de Los Andes hacia el este hasta el colector del río Desaguadero; este finalmente drena en el río Colorado (**Figura 1**). Estos ríos abastecen los principales oasis productivos de la región. El río San Juan abastece al Gran San Juan y los valles productivos Ullum,

Tulum y Zonda. En la provincia de Mendoza, el río Mendoza y el río Tunuyán inferior abastecen al oasis Norte, allí se concentra mayoritariamente la población de la provincia y se desarrollan las principales actividades industriales. El río Tunuyán superior abastece el oasis Centro de la provincia, y los ríos Diamante y Atuel abastecen el oasis Sur. El río Grande es el más caudaloso de la provincia, se une al río Barrancas, abastecen localidades rurales en la provincia de Mendoza. La confluencia de estos ríos da origen al río Colorado.

En la región de los Andes Centrales, se presentan dos sistemas de precipitación; uno estival influenciado por masas de aire continental (Compagnucci et al., 2002; Masiokas et al., 2006) localizado en las zonas de llanuras de las cuencas y un sistema invernal sobre la elevación más alta de Los Andes, producto de la interacción entre los flujos de humedad provenientes de los sistemas sinópticos de latitudes medias del Pacífico Sur, la topografía de Los Andes, la ocurrencia de bajas segregadas durante la estación fría (Garreaud y Fuenzalida, 2007) y el paso de frentes fríos (Seluchi et al., 2006). La precipitación media entre los 32 °S-36 °S y 69 °O-68 °O alcanza los 600 mm anuales (Viale et al., 2019), con máximos durante el período invernal (**Figura 2**). La mayor precipitación media anual se registra en la cuenca del río Tunuyán, mientras que los registros más bajos pertenecen a la cuenca del río San Juan (**Tabla 1**). La temperatura en la región es menor conforme aumenta la altitud de la cordillera y la latitud, con mínimas durante los meses de junio a agosto y máximas de diciembre a febrero (**Figura 2**). Los valores medios anuales de temperatura muestran que la menor y mayor temperatura son para las cuencas del río Tunuyán y Barrancas respectivamente (**Tabla 1**).

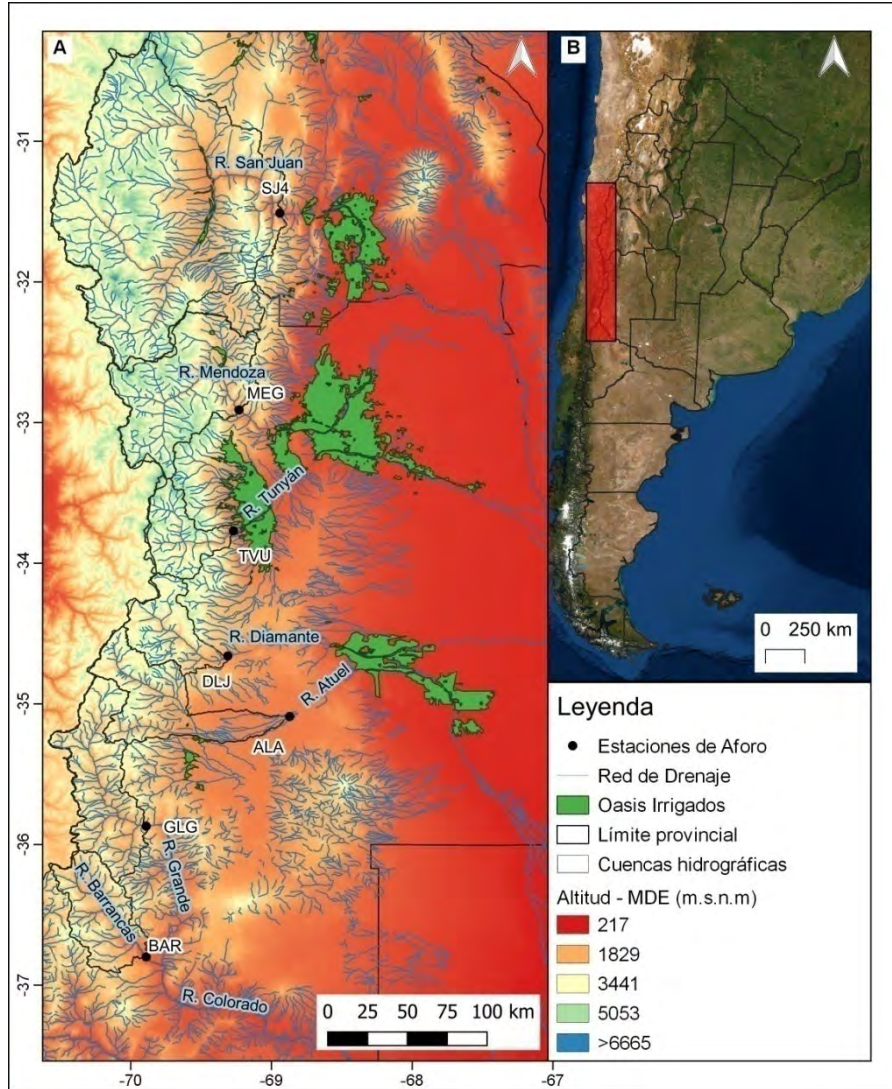


Figura 1: Localización de las cuencas que integran el sistema hidrográfico del río Colorado, las estaciones de aforo y principales oasis productivos. Ver siglas en **Tabla 1**. Elaboración propia.

Cuenca	San Juan	Mendoza	Tunuyán	Diamante	Atuel	Grande	Barrancas
Estación (sigla)	Km-101 (SJ1)	Guido (MEG)	Valle de Uco (TVU)	La Jaula (DLJ)	La Angostura (ALA)	La Gotera (GLG)	Barrancas (BAR)
Registro	1971-2018	1960-2018	1960-2018	1971-2018	1960-2018	1971-2018	1960-2018
Precipitación (mm)							
Media	243,4	352,1	442,9	502,1	459,8	495,6	374,7
Máximo	534,6	771,1	1048,8	934,3	841,4	886,0	640,8
Mínimo	90,14	140,1	169,1	242,9	198,8	167,0	146,3
Desvest	107,3	132,1	163,8	165,3	147,3	154,7	103,7
CV (%)	44,1	37,5	37,0	32,9	32,0	31,2	27,7
Temperatura (°C)							
Media	3,72	2,46	2,19	4,06	7,48	6,45	7,73
Máximo	4,84	3,17	2,96	4,80	8,24	7,05	8,37
Mínimo	2,91	1,56	1,18	3,01	6,46	5,42	6,79
Desvest	0,45	0,40	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39
CV (%)	12,08	16,47	18,92	10,19	5,39	6,18	5,04
Caudal (m³/s)							
Media	59,99	45,36	28,08	32,54	34,92	104,33	35,53
Máximo	151,72	93,95	54,24	72,69	69,50	202,47	66,87
Mínimo	19,98	23,43	15,41	16,73	19,04	41,58	14,70
Desvest	31,56	15,45	9,02	11,52	9,86	40,14	11,70
CV (%)	52,60	34,06	32,14	35,41	28,23	38,47	32,93

Tabla 1: Valores medios anuales para el período de registro de cada variable por cuenca. Los datos de Precipitación y temperatura pertenecen a la base de datos Climate Research Unit y los datos de caudal a la Secretaría de Políticas Hídricas de la Nación. Elaboración propia.

Las cuencas poseen un gradiente altitudinal de Oeste a Este con un rango de más de 6000 a 900 msnm y una importante superficie cubierta de glaciares en los sectores

de mayor altura. El régimen hidrológico es nivo-glaciario, el año hidrológico comienza en julio. La variación estacional del caudal es función de las variaciones estacionales de la precipitación, la temperatura y características topográficas de la cuenca. El caudal mínimo anual ocurre durante los meses de junio a agosto y los máximos anuales desde noviembre a febrero (Lauro et al., 2018). El mayor caudal medio anual se registra en la cuenca del río Grande y el menor en la cuenca del río Tunuyán (**Tabla 1**).

Las variables analizadas presentan variabilidad interanual, los coeficientes de variación son mayores para las variables precipitación (28 a 44%) y caudal (28 a 52%) siendo las dos variables mayores para la cuenca del río San Juan.

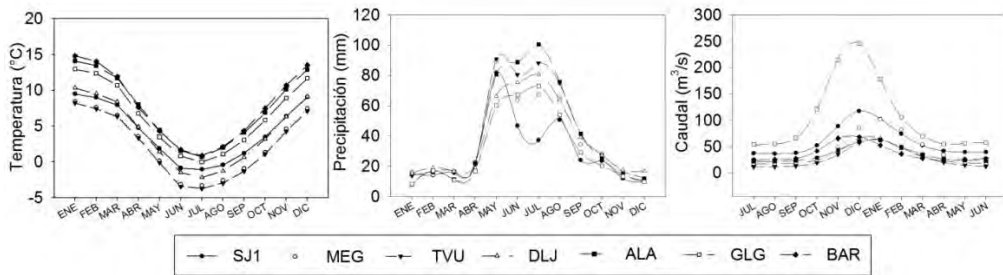


Figura 2: Marcha anual de la Temperatura, Precipitación y Caudal. Los gráficos de temperatura y precipitación se elaboraron partir de la base de datos *Climate Research Unit* para el período 1960-2018. Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

En la región los registros instrumentales de precipitación y temperatura no presentan la longitud y la calidad adecuada para realizar estudios climáticos. Por ello, se empleó la base de datos grillados de precipitación y temperatura del *Climate Research Unit* (CRU) TS4.03 (Harris et al., 2014), con resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Esta base de datos representa de forma adecuada las variaciones climáticas en la región de los Andes Centrales (Rusticucci et al., 2014). La correlación entre los datos grillados y datos instrumentales de precipitación y temperatura existentes en algunas cuencas resultan significativos (Lauro et al., 2021).

Dicha base de datos posee un registro desde el año 1900 hasta la actualidad. En el presente estudio se obtuvo la precipitación y temperatura media anual para el período coincidente con el registro de caudales en cada una de las cuencas (Ver período de registro en **Tabla 1**). Se realizó un promedio ponderado entre el valor de la variable climática y la superficie de la celda comprendida dentro de los límites de la cuenca.

De la base de datos de la Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas de la Nación se obtuvieron registros instrumentales de caudales medios diarios en cada una de las cuencas, a partir de los cuales se construyeron las series de caudal medio anual para los períodos de análisis 1960-2018 y 1971-2018. Los puntos de aforo considerados se encuentran aguas arriba de las obras hidráulicas.

Los datos de caudal medio diario fueron rellenados según los métodos explicados en Lauro et al (2016). Además, se verificó la normalidad, aleatoriedad e independencia de las series anuales de temperatura, precipitación y caudales, los test empleados se detallan en Lauro et al. (2016). Los supuestos se evalúan dado que son condiciones requeridas en algunos de los test de tendencias y saltos.

Detección de tendencias y saltos

Para la detección de tendencias y saltos de las variables precipitación, temperatura y caudal medio anual se aplicaron test paramétricos y no paramétricos. Para la identificación de tendencia los test aplicados fueron: t student (Remington y Schork, 1974), Sperman Rank Order Correlation (Kundzewicz y Robson, 2000), Mann y Kendall (Hirsch et al., 1982; Westmacott y Burn, 1997) y sus correcciones por preblanqueo para series autocorrelacionadas (Yue et al., 2002) y por varianza (Hamed y Rao, 1998). Para la detección de saltos se aplicó la prueba estándar de homogeneidad normal (SNHT; Alexandersson, 1986), el test de Pettitt (Pettitt, 1979), el test de Buishand por rangos (Buishand, 1982), y el test de Buishand U (Buishand, 1984).

En todos los test se trabajó con $\alpha=0,05$. La sola indicación de no homogeneidad significativa de algún método, se toma como motivo de sospecha de cambios graduales o saltos.

Análisis de ondas

Se estudió la variabilidad periódica en las series temporales de precipitación, temperatura y caudal medio anual de cada cuenca mediante la transformada de onda continua (CWT; por sus siglas en inglés *continuous wavelet transform*). El análisis CWT permite analizar fenómenos periódicos de diferentes frecuencias, en series temporales no estacionarias. La CWT puede descomponer una señal y representarla en el dominio de frecuencia de tiempo, permitiendo observar el modo dominante de variabilidad y la forma en que estos modos varían en el tiempo (Torrence y Compo, 1998). La significancia estadística del espectro de potencia se prueba bajo la hipótesis nula que los datos del proceso de generación están dados por un proceso estacionario AR(0) o AR(1) para un espectro de fondo de una cierta potencia, en este caso, el espectro de la frecuencia media de Fourier.

Luego, para estudiar la variabilidad conjunta del caudal medio anual con la precipitación y temperatura en cada cuenca, se utilizó el análisis de coherencia de ondas (WC; por sus siglas en inglés *wavelet coherence*).

El análisis de coherencia de ondas tiene la capacidad de detectar los intervalos de tiempo-frecuencia en que dos series de tiempo tienen fuerte interacción. El concepto de coherencia de ondas es análogo a la coherencia de Fourier, brindando una cantidad entre 0 y 1 que indica la correlación cruzada entre dos series de tiempo en función de la frecuencia (Torrence y Compo, 1998). Resulta una medida de la intensidad de la covarianza de las dos series en el espacio tiempo-frecuencia, que distingue además la relación de fase entre ellas y la evolución temporal de la co-variación.

La definición de la coherencia se asemeja a la definición tradicional del coeficiente de correlación. La alta co-variabilidad entre las series implica valores de WC cercanos o iguales a 1 mientras que si las series no presentan ningún tipo de sincronización el WC es cercano a 0. La relación de fase entre las series da información de la sincronía entre las fluctuaciones para una determinada frecuencia y tiempo, ya sea en fase, anti-fase o rezago temporal (Gristed et al., 2004).

El nivel de significancia es estimado usando un test Monte Carlo con ruido rojo determinando la significancia estadística al 95% (Torrence y Webster, 1999).

Información detallada del cálculo e interpretación de resultados derivados de la metodología wavelet se puede encontrar en Torrence y Compo (1998) y Grinsted et al. (2004), entre otros trabajos.

Para los análisis de onda continua y coherencia de ondas se empleó el paquete de R *biwavelet* (Gouhier, 2018). La función madre utilizada fue *Morlet*. Esta función es empleada comúnmente en estudios hidroclimáticos de la región (Labat, 2008; Agosta y Compagnucci 2012, Caragunis, 2018). Para considerar los errores en la estimación de los coeficientes en los extremos de las series temporales se construye el cono de influencia (Grinsted et al., 2004).

RESULTADOS

Análisis de la tendencia y saltos

La variación interanual, las tendencias y los saltos abruptos para las series analizadas en cada una de las cuencas se muestran en la **Figura 3**.

En las cuencas de los ríos Grande y Barrancas se detecta tendencia significativa a la disminución de la precipitación con coeficientes de -3,61 y -2,36 mm/año respectivamente. Dicha tendencia en la cuenca del río Grande se acompaña de un salto significativo negativo en 1987. En las cuencas de los ríos Mendoza y Tunuyán se detectaron en ambos casos incrementos significativos de la precipitación mediante el análisis saltos en los años 1981 y 1976 respectivamente. En las demás cuencas no se encontraron cambios significativos.

Respecto a las series de temperatura todos los sitios presentan tendencias significativas positivas, a excepción de la cuenca del río San Juan que no presenta tendencia significativa, siendo el incremento promedio de la temperatura en la región de 0,01°C por año. El incremento gradual de la temperatura se acompaña con saltos significativos positivos en su mayoría en la década de 1980. Particularmente, en la cuenca San Juan y Mendoza en el año 1984, en Tunuyán en 1985, en Diamante, Atuel y Grande en el año 1988 y en Barrancas dos pruebas (test) indicaron el año 1976 mientras otros dos test indicaron el año 1984, siendo el salto del año 1976 el de mayor aumento.

La tendencia en las series de caudales medios anuales en la región resulta ser principalmente negativa siendo la del río Diamante y la del río Grande las únicas significativas a partir del análisis estadístico. En la cuenca del río Mendoza se detecta un salto positivo significativo en el año 1976 que ocasiona una tendencia positiva aunque no significativa. Si bien, se observa una disminución del caudal en el año 2008/2009 en la cuenca del río Mendoza (**Figura 3**) dicha disminución, en valor absoluto, es menor que el incremento que se produce en el salto de la década del 70. En las demás cuencas se detectan saltos significativos negativos: en 2009 para los ríos Tunuyán, Diamante, Grande y Barrancas, y en el año 2008 para el río Atuel. A diferencia de lo expresado para la cuenca del río Mendoza, en la cuenca del río Atuel el salto detectado en el año 2008 en términos absolutos es mayor respecto en salto de la década del 70 (Lauro et al., 2019). Es decir, que es mayor la disminución del caudal en los últimos diez años que el incremento que se produjo en la década del 70. La disminución del caudal de la región en la última década se corresponde con precipitaciones por debajo de la media y temperaturas por encima de la media. En líneas generales, la tendencia de la precipitación acompaña a la tendencia de los caudales, mientras que la situación inversa ocurre entre el caudal y la temperatura.

Análisis transformada de ondas continuas

Los resultados del análisis WTC se presentan en la **Figura 4**, donde el eje vertical muestra los ciclos en años presentes en la serie y el eje horizontal los años en los que se presentan los ciclos; las líneas negras indican ciclos significativos al 90%. Los colores cálidos indican que los ciclos (períodos) poseen una mayor intensidad caso contrario para los colores fríos. El cono de influencia (sombra blanca) indica la zona donde los efectos de borde son importantes.

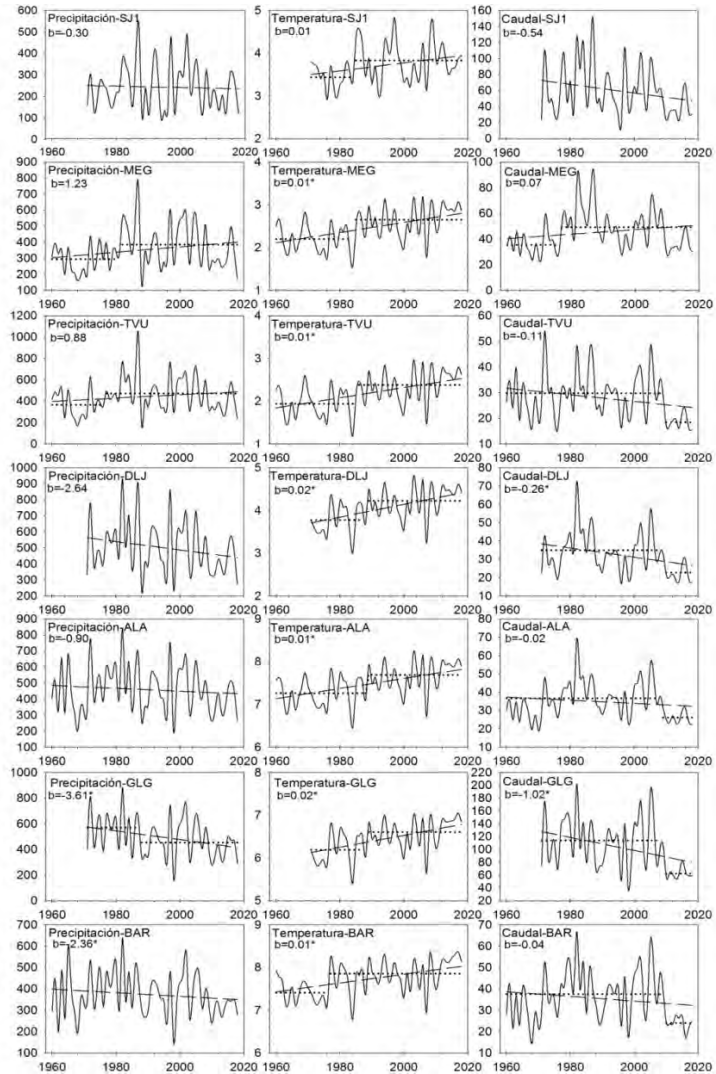


Figura 3: Series de precipitación (mm), temperatura (°C) y caudal (m³/s) para todas las cuencas analizadas. La línea de trazos muestra la tendencia lineal, se incluyó el coeficiente de tendencia (b) en las unidades de las variables, señalando con un asterisco los casos significativos. La línea de puntos indica los valores medios de la serie en los períodos previos y posteriores a los saltos significativos detectados. Elaboración propia.

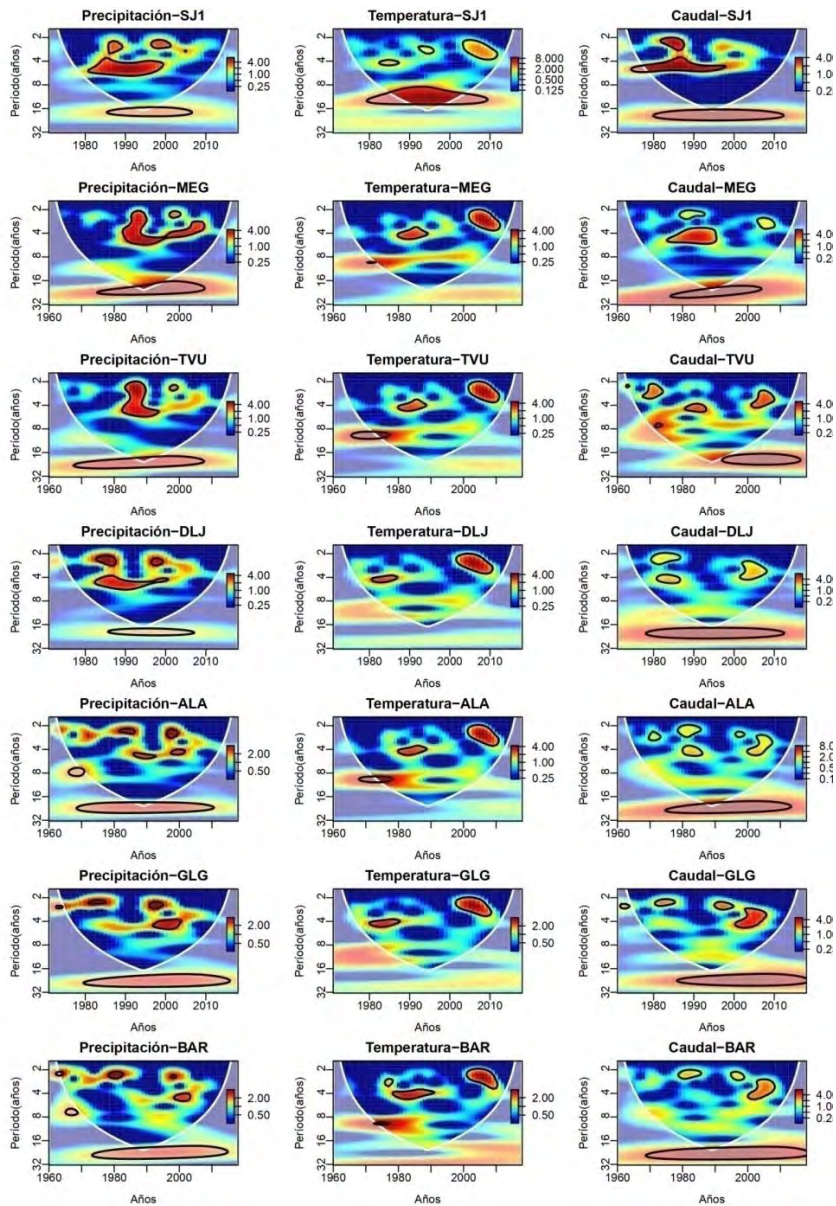


Figura 4: Análisis transformada de onda continua para las variables precipitación, temperatura y caudal. Elaboración propia.

En el análisis WTC realizado para la variable precipitación se observan patrones similares de norte a sur donde los ciclos en la banda 2-6 años en la década del 80, 90 y 2000 resultan significativos. Además se observan ciclos significativos en la banda 16-32 años aproximadamente desde las décadas 1970/80-2000/10. Particularmente, para la cuenca del río Atuel y Barrancas se observan ciclos significativos de 8 años en la década de 1970.

Para la variable temperatura todos los casos presentan una composición similar. En las cuencas TVU, ALA y BAR resulta significativo el período 8-16 años presentes entre la década del 1970-80, este período también es significativo en la cuenca del río San Juan pero se extiende a lo largo de toda la serie de datos analizada. En todos los casos en la década del 1980-90 se observan ciclos significativos en la banda de 4 años. Finalmente, en la década 2000-10 los períodos en la banda de 2-4 años resultan significativos y en líneas generales representan la mayor energía. En ningún caso resulta significativo períodos de baja frecuencia.

Para la variable caudal en la cuenca del río San Juan se observa un ciclo de 4-6 años desde 1975-2000, en las bandas 2-3 años entre 1980-90 y en la banda 16-32 años en el período 1980-2010. En la cuenca del río Mendoza entre 1980-90 las bandas 2 y 4-6 años son significativas, siendo la primera la de mayor energía. También se observa significativa la banda 2-4 años en 2000-10. La banda 16-32 años se muestra significativa en la década del 90. En la cuenca del río Tunuyán resulta significativa la banda 2-4 años en 1970, la banda 4-6 años en 1980-90 y la banda 2-4 en el año 2000-10. Desde la cuenca del río Diamante al Barrancas, el análisis presenta intensidades similares para los períodos en las bandas 2-6 años presentes en la década de 1980-90. También se presentan ciclos significativos en las bandas 4-6 en la década 2000-10. En las cuencas del río Atuel y Barrancas, la mayor energía se observa en las bandas 16-32 en 1970.

En líneas generales, la mayor actividad energética se concentra en los períodos interanuales (2-8 años). Los espectros de potencia elevados también se distinguen en frecuencias bajas (16-32 años), principalmente en las variables precipitación y caudal, si bien estas fluctuaciones presentan mayor persistencia en el espectro, por

lo general, se encuentran fuera del cono de influencia producto de la longitud de la serie analizada.

Análisis coherencia de ondas

El análisis de coherencia de ondas permite identificar si dos series de tiempo (precipitación- caudal y temperatura-caudal) presentan oscilaciones en la misma frecuencia y si están acopladas o no. Los resultados se presentan en la **Figura 5**. Los vectores horizontales orientados a la derecha (izquierda) indican que las series se encuentran en fase (anti-fase), en tanto los vectores con ángulos entre 90° y -90 reflejan un retardo de alguna de las dos variables de un cuarto de período (período/4).

En líneas generales se observa que de norte a sur existen diferencias entre las frecuencias y distribución temporal que presentan alta coherencia entre la precipitación y el caudal. En tanto, la coherencia entre temperatura y caudal en las distintas cuencas analizadas presentan ciertas coincidencias.

En la cuenca del río San Juan el caudal y la precipitación se encuentran en fase, es decir, que existe una relación lineal, para períodos de 6 años durante 1970-2005 y para períodos de 16 años entre 1995-2000. En tanto, oscilaciones de períodos de 2-4 años se observa un adelantamiento de la precipitación respecto del caudal. El caudal con la temperatura muestran correlación para oscilaciones de 4-6 años durante el período 1980-1990, con un retardo de 1-1,5 años de los caudales con respecto a la temperatura.

En la cuenca del río Mendoza, las series de precipitación y caudal tienen elevada potencia y se encuentran en fase en la frecuencia entre 4-8 años durante 1980-1990, como así en la frecuencia entre los 2-6 años entre el 2000-2010, con un retardo en la serie de caudales. Con la temperatura coinciden en la frecuencia 4-6 años entre 1980-1990, con un retardo también en la serie de caudales. Para período 2000-2010 se encuentran potencias significativas con un desfase mayor de la serie de caudales, de hasta 3 años para las frecuencias 2-4 años y de 4-5 años para las frecuencias 6-7 años.

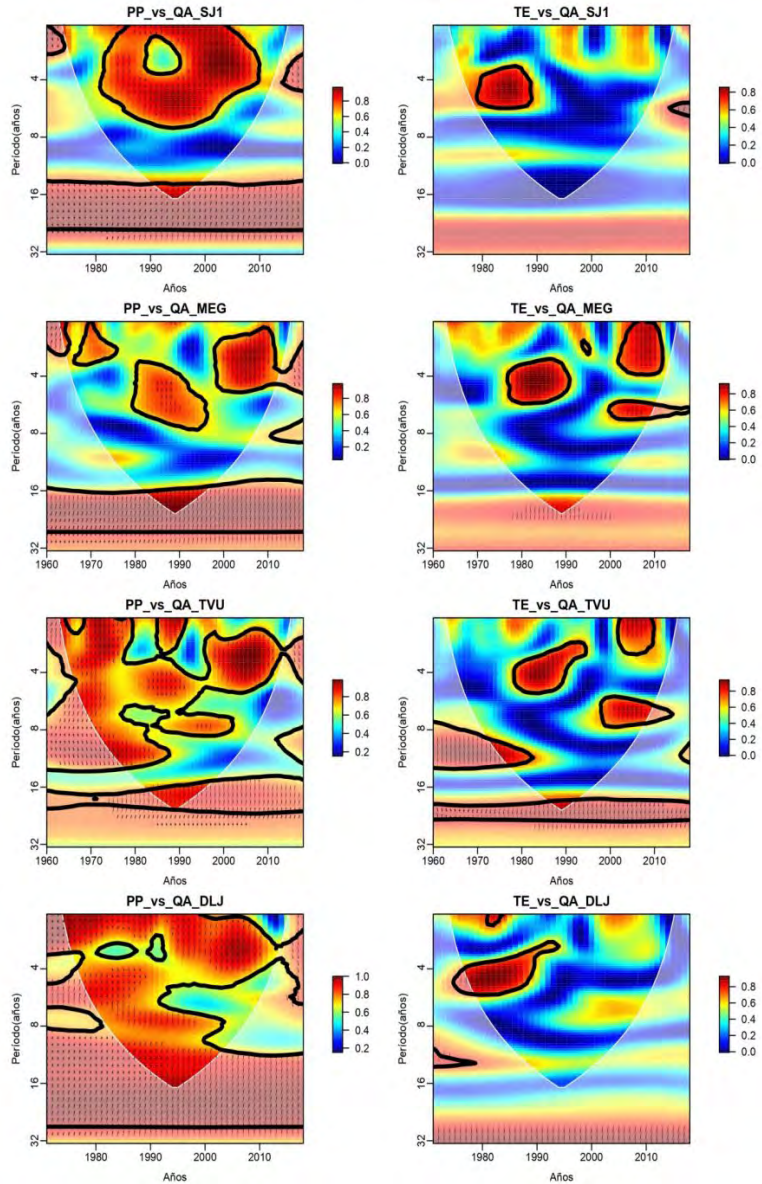


Figura 5: Análisis coherencia de ondas entre las variables precipitación-caudal y temperatura-caudal. Elaboración propia.

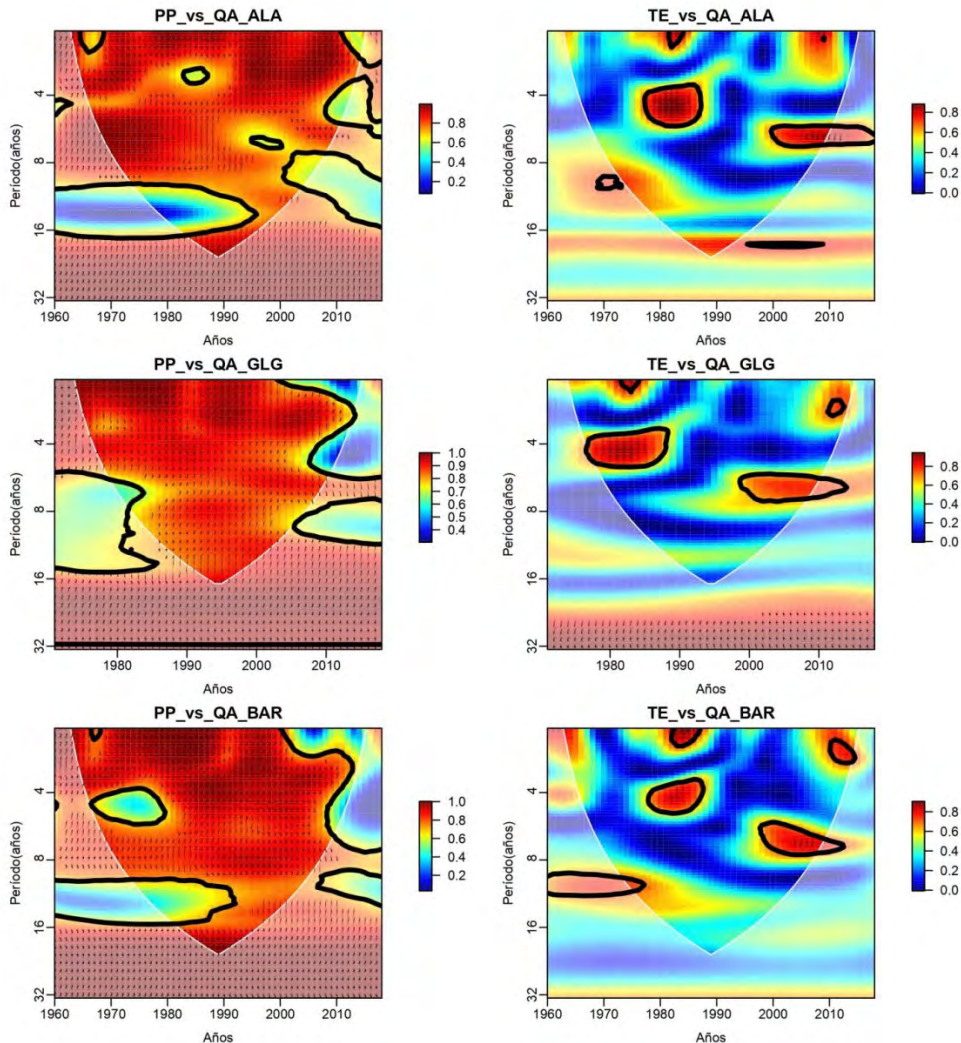


Figura 5 continuación: Análisis coherencia de ondas entre las variables precipitación-caudal y temperatura-caudal. Elaboración propia.

En la cuenca del río Tunuyán las series de caudal y precipitación muestran elevada potencia para ciclos entre 2-4 años en fase durante el período 1960-1980 y con

adelantamiento de la precipitación para el final del período analizado. Para ciclos de 4-6 años ambas series se encuentran en fase en 1980-1990. Para ciclos de 16 años se verifica también una elevada potencia de variabilidad, con un adelantamiento de la serie de precipitación. Respecto la relación entre caudal y temperatura muestra resultados similares a los descriptos para la cuenca del río Mendoza.

Para la cuenca del río Diamante y las cuencas localizadas al sur de esta, el comportamiento de la relación precipitación-caudal es similar. Existiendo elevada correlación para las frecuencias entre 2-16 años durante todo el período analizado. En la cuenca del río Diamante la relación precipitación-caudal con mayor intensidad es para ciclos de 2 años en el 2000-2010 con adelantamiento de la precipitación. Entre ciclos de 4-8 años en 1980-1990 se presenta una relación lineal entre ambas variables. También se destacan períodos significativos de ciclos de 8-16 años entre 1990-2000, dicha relación también es significativa en la cuenca del río Grande. Se puede observar que para los ciclos de 8-16 años para las cuencas de río Atuel y Barrancas no existe una correlación entre 1980-1990. En cuanto a la relación temperatura-caudal en todos los casos se presentan ciclos significativos de 4-8 años en el período 1980-1990 y otro entre el 2000-2010.

Se observa que mientras la relación precipitación-caudal muestra niveles altos de coherencia en la mayoría de las frecuencias a lo largo de toda la serie temporal, la relación temperatura-caudal es significativa sólo para algunas frecuencias y períodos de tiempo.

DISCUSIÓN

Entender la variabilidad del sistema hidroclimático en la región centro oeste de Argentina resulta de gran importancia para el manejo de los recursos hídricos de las poblaciones asentadas al pie de la Cordillera de los Andes.

Dado que las cuencas hidrográficas de la región de Cuyo presentan un régimen hidrológico nivo-glaciario (Lauro et al., 2016), se espera que la evolución temporal de las variables precipitación y temperatura acompañen al comportamiento del escurrimiento. Los resultados muestran que mientras la temperatura tiende a incrementarse en todas las cuencas, siendo este hecho consistente con el

incremento de la temperatura global (Magrin et al., 2014) y las proyecciones realizadas con diversos modelos globales (Zazulie et al., 2017), las tendencias de las precipitaciones acompañan a las tendencias en los caudales. Una excepción a esta situación la constituye la cuenca del río Tunuyán donde la tendencia positiva (no significativa) de la precipitación no acompaña al decrecimiento del escurrimiento asociado al salto negativo del año 2009.

El estudio de datos históricos revela que desde finales de siglo XIX el caudal del río Atuel presenta una disminución sostenida con ciclos de crecidas y sequías (Rojas y Prieto, 2020). Los datos instrumentales analizados desde mediados de siglo XX hasta el año 2018, muestran que los valores medios tienden a disminuir en el largo plazo impulsado por un salto negativo en la década 2010. Sin embargo, se identificaron cambios abruptos por encima de la media en la década del 70 (Lauro et al., 2019). En el dominio de la frecuencia, se encontraron ciclos en escala interanual de 2-6 años. En cuanto a la variabilidad de baja frecuencia, se distinguen ciclos de 16-32 años. Caragunis (2018) identifica una importante componente decenal en los escurrimientos del río Atuel.

Dado que los análisis de tendencia están ligados a la longitud de la serie, la incorporación de una década de datos de caudales en los últimos años revierten los resultados de las tendencias obtenidos por Lauro et al. (2019) para los ríos Diamante y Barrancas. Mientras, para el río Grande, su coeficiente de tendencia negativa se incrementa. Cabe destacar que los datos incorporados coinciden con un evento de sequía hidrológica de características extraordinarias debido a su extensión, duración y severidad en los últimos 50 años en la región (Vaccarino et al., 2020; Rivera et al., 2021).

Los ciclos identificados a partir del análisis de onda exhiben los cambios en la varianza de las variables hidroclimáticas analizadas. Se destaca que dichos cambios no son continuos y cambian de intensidad y frecuencia a lo largo de la serie analizada. Tanto las precipitaciones y los caudales presentan ciclos que corresponden con variaciones interanuales y decenales en las bandas de 4-8 años y 16-32 años, respectivamente. Lauro et al (2021) explica que la variabilidad de alta frecuencia en las series de caudal en toda la región se asocia con el ENSO, dicha relación expresa con mayor intensidad en el período comprendido entre 1970-2000. En los ríos San

Juan, Atuel y Colorado, Caragunis (2018) identifica ciclos significativos de alrededor de 22 años con mayor señal entre los años 1970 y 1990. La asociación entre la precipitación y caudal con el índice ENSO y el índice de la PDO (Compagnucci et al., 2000; Lauro et al., 2019; Masiokas et al., 2019; Lauro et al., 2021), indican que los forzantes oceánicos-atmosféricos inducen ciclos de baja y alta frecuencia en la región de los Andes Centrales. Particularmente, los incrementos en los caudales anuales están asociados a aumentos en la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 (Carril et al., 1997; Compagnucci y Araneo, 2007; Lauro et al., 2019). Durante la fase positiva/negativa del índice PDO los caudales del centro oeste argentino se encuentran por encima/debajo de sus valores medios (Masiokas et al., 2010; Lauro et al., 2019).

El escurrimiento de las cuencas localizadas en la vertiente este de la cordillera de los Andes (28-37°S), es altamente dependiente la acumulación de las precipitaciones níveas (Masiokas et al., 2006) y la variabilidad intra-estacional de la temperatura (Araneo et al., 2015), entre otros factores. En cuanto a la relación entre la precipitación y el caudal resulta mayor en el intervalo de frecuencias interanuales presente a lo largo de todo el período de estudio, en tanto, en algunas cuencas se encontró relación en frecuencias decenales en la década del 90. Para períodos interanuales se observa un adelantamiento de la precipitación, es decir, que existe un retardo entre que la precipitación aumenta y el incremento de caudal. El rol de la temperatura en las cuencas de régimen nivo-glacial radica en los procesos de fusión nivo-glaciario o inhibición de la misma, esta relación se presenta claramente con patrones intra-estacionales (Araneo et al., 2015). En escala interanual la relación entre la temperatura y el caudal se observa en frecuencias de 4-8 años en el período comprendido entre 1980-1990, con un adelantamiento de la temperatura respecto del caudal.

CONCLUSIÓN

Los componentes del ciclo hidrológico en cuencas de régimen nivo-glaciario en largas escalas temporales se vinculan con patrones de circulación oceánico-atmosférico globales que afectan la variabilidad climática regional. Conocer el comportamiento de los diversos componentes del ciclo hidrológico en diversas escalas temporales y

espaciales permite mejorar la gestión de los recursos hídricos. Particularmente, el estudio de la variabilidad hidroclimática en la región de Cuyo apunta a contribuir a la seguridad hídrica de las comunidades involucradas, dado que durante la última década se ha visto comprometida producto de una disminución de la oferta hídrica por la disminución en las precipitaciones, y el incremento de la temperatura en la región.

Los cambios graduales identificados en la región no presentan un comportamiento homogéneo. El caudal de los ríos Diamante y Grande son los únicos que presentan tendencias negativas significativas desde el análisis estadístico, siendo la disminución del caudal en la cuenca del río Grande la de mayor magnitud en términos relativos. Es notable destacar que hacia el sur del río Tunuyán todos los ríos presentan un salto negativo significativo a principios de la década 2010.

Tanto para la precipitación como para el caudal se identificaron ciclos interanuales y decenales, siendo estos no uniformes a lo largo del período de análisis. La temperatura de la región tiende a aumentar, presenta ciclos interanuales con mayor intensidad en la década 2000-2010.

La relación entre la precipitación y el caudal se observa en las bandas de frecuencias interanuales y en algunos casos en bandas decenales. En tanto, la relación del caudal con la temperatura de mayor intensidad ocurre en las bandas 4-8 años. Se considerará realizar el análisis de coherencia en la escala temporal mensual motivado por las características de régimen hidrológico de las cuencas, ya que la influencia de la temperatura es más importante en escalas estacionales o intra-estacionales.

La disponibilidad hídrica superficial en cada una de las cuencas está sujeta a cambios de largo plazo, como así también a fluctuaciones interanuales y decenales asociados a fenómenos climáticos de macroescala. Conocer las múltiples escalas temporales de fluctuaciones como así también los diversos procesos que las originan resulta de interés para mejorar los modelos de predicción del escurrimiento.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo posee financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) mediante el proyecto PICT 2019-03430.

BIBLIOGRAFÍA

Agosta, E., & Compagnucci, R.H. (2012). Central-West Argentina Summer Precipitation Variability and Atmospheric Teleconnections. *American Meteorological Society*, 25, 1657-1677.

Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climate*, 6, 661-675.

Araneo, D.C., Rivera, J.A., & Villalba, R. (2015). Variabilidad intraestacional de las condiciones néveas de los Andes Centrales relacionadas con los cambios en el régimen hidrológico del río Atuel. *Acta geológica lilloana*, 27, 2: 77-86.

Buishand, T.A. (1982). Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. *Journal of Hydrology*, 58, 11-27.

Buishand, T.A. (1984). Tests for Detecting a Shift in the Mean of Hydrological Time Series. *Journal of Hydrology*, 73, 51-69.

Caragunis, J.I. (2018). Variabilidad de baja frecuencia en los caudales de los ríos del centro-norte de la Argentina. Aplicación en el análisis de sequías hidrológicas. Tesis de Licenciatura en Cs. de la Atmósfera. UBA.

Carril, A., Doyle, M., Barros, V., & Núñez, M. (1997). Impacts of climate change on the oases of the Argentinean cordillera. *Climate Research*, 9, 121-129.

Compagnucci, R., Blanco, S., Figliola, A., & Jacovkis, P. (2000). Variability in subtropical Andean Argentinean Atuel River; a wavelet approach. *Environmetrics*, 11, 251-269.

Compagnucci, R.H., & Araneo, D. (2007). Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(3), 23-35.

Garreaud, R., & Fuenzalida, H. (2007). The Influence of Andes on cutoff lows: A modeling study. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1596-1613.

Gonzalez-Reyes, A., et al. (2017). Spatio-temporal variations in hydroclimate across the Mediterranean Andes (30°–37°S) since the early 20th century. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 1929–1942.

Gouhier, T. C., Grinsted, A. & Simko, V. (2018). R package biwavelet: Conduct Univariate and Bivariate Wavelet Analyses (Version 0.20.17). Available from <https://github.com/tgouhier/biwavelet>

Grinsted, A., Moore, J. C. & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561-566.

- GWP. (2000). *Towards Water Security: A Framework for Action*. Global Water Partnership: Stockholm.
- Hamed, K.H., & Rao, A.R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J. of Hydrology*, 204(1-4), 182–196.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborna, T.J. & Listera, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International journal of climatology*, 34, 623–642.
- Hirsch, R.M. (1982). A comparison of four streamflow record extension techniques. *Water Resources Research*, 18(4), 1081-1088.
- Klees R., Haagmans, R. (2000). *Wavelet in the geosciences*. Springer-Verlag: Berlin.
- Kundzewicz, Z., & Robson, A. (2000). Detecting trend and other changes in hydrological data. WCDMP-45. WMO/TD, 1013. Geneva.
- Labat, D. (2008). Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers. *Advances in Water Resources*, 31, 109–117.
- Lauro, C., Vich, A., & Moreiras, S.M. (2016). Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *Geoacta*, 40(2), 28-51.
- Lauro, C., Vich, A., & Moreiras, S.M. (2018). Regional flood frequency analysis in the Central Western River Basins (28°-37°S) of Argentina. *River Research and Applications*, doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3319>
- Lauro, C., Vich, A., & Moreiras, S.M. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indexes in western river basins of Argentina. *Hydrological Science Journal*, 57 (1). doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>
- Lauro, C., Vich, A., Moreiras, S.M., Bastidas, L., Otta, S., Vaccarino, E. (2021). Regionalización del caudal máximo anual en cuencas del sistema hidrográfico del río Colorado, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47. <http://doi.org/10.18172/cig.4465>.
- Lauro, C., Vich, A., Otta, S., Moreiras, S.M., Bastidas, L., Vaccarino, E. (2021). Modos de variabilidad hidroclimática en los Andes Centrales (30-37°S). AAGG 2021.
- Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña, (2014). Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.
- Mauas P, Buccino A, & Flamenco E. (2011). Long-term solar activity influences on South American rivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(2–3), 377–382.

- Mallat, S. (1999). A Wavelet tour of signal processing. Wavelet analysis and its applications. *Academic Press*, San Diego, 637.
- Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B.H., Le Quesne C., & Aravena, J.C. (2006). Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951 – 2005, Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate*, 19, 6334–52.
- Masiokas, M., Iba, R., Luckman, B., & Mauget, S. (2010). Intra-to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *J. of Hydrometeorology*, 11, 822-831.
- Masiokas, M.H., Cara, L., Villalba, R. et al. (2019). Streamflow variations across the Andes (18°–55°S) during the instrumental era. *Sci Rep* 9, 17879. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53981-x>
- Massone, H., Martinez, D., Vich, A., Lodoño, M.Q., Trombotto, D., & Grondona, S. (2016). Snowmelt contribution to the sustainability of the irrigated Mendoza s Oasis, Argentina: an isotope study. *Environ, Earth Sci*, 75,520. doi <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5141-9>.
- Meyers, S.R. (2014). *Astrochron: An R Package for Astrochronology*. <https://cran.r-project.org/package=astrochron>
- Otta, S., Lauro, C., Vich A., Vaccarino, E., Bastidas L. Variabilidad de la oferta hídrica en los oasis irrigados de Mendoza y San Juan (Argentina) en el período 1981-2018. *Actas E-ICES 15. Virtual; Octubre 2020*.
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist*, 28, 126-135.
- Rajagopalan & Lall, (1998). Interannual variability in western US precipitation. *Journal of Hydrology*, 210, 51-67.
- Rao, A.R & Hamed, K. (2003). Multi-taper method of analysis of periodicities in hydrologic data. *Journal of Hydrology*, 279, 125-143.
- Remington, R.D., & Schork, M.A., (1974). *Estadística Biométrica y Sanitaria*. Editorial Prentice/Hall International: Bogota.
- Rivera, J.A., Araneo, D.C., & Penalba, O.C. (2014). Climatología de sequías hidrológicas en los ríos andinos de Argentina. *XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, San Juan, Argentina, 10-14 de noviembre de 2014*. ISBN: 978-987-33-5605-6.
- Rivera, J.A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241, 104953.
- Rivera, J. A., Penalba, O. C., Villalba, R., & Araneo, D. C. (2017). Spatio-temporal patterns of the 2010–2015 extreme hydrological drought across the Central Andes, Argentina. *Water*9,652. doi: <https://doi.org/10.3390/w9090652>.

Rivera, J.A., Otta S., Lauro, C., & Zazulie, N. (2021). A decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. *Front. Water* 3, 640544. doi: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544>.

Rojas, F., & Prieto, M. R. (2020). La variabilidad hídrica en la cuenca del río Atuel, desde la climatología histórica: siglo xviii a mediados del xx. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 29 (2), 326-353. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n2.75960>

Rusticucci, M., Zazulie, N., & Raga G.B. (2014). Regional winter climate of the southern central Andes: Assessing the performance of ERA-Interim for climate studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 8568–8582. doi: <https://doi.org/10.1002/2013JD021167>.

Seluchi, M.E., Garreaud, R.D., Norte, F.A., & Saulo, A.C. (2006) Influence of the subtropical Andes on baroclinic disturbances: A cold front case study. *Mon. Wea. Rev.*, 134:3317–3335.

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:61-78.

Vaccarino, E., Otta, S., Lauro, C., Bastidas, L., Vich, A. Sequías hidrológicas en la región de Cuyo, Argentina. *Actas E-ICES* 15. Virtual. Octubre 2020.

Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L.E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J.A., & Zalazar, L. (2019). Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Front. Environ. Sci.* 7, 69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>.

Westmacott, J., & Burn, D. (1997). Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Curchill Nelson River Basin. *Journal of Hydrology*, 202, 263-279.

Yue S., & Wang, C.Y. (2002) The influence of serial correlation on the Mann-Whitney test for detecting a shift in median. *Advances in Water Resources*. 25, 325–333.

Zazulie, N., Rusticucci, M., Raga, G.B. (2017). Regional climate of the subtropical central Andes using high-resolution CMIP5 models—part I: Past performance (1980–2005). *Clim. Dyn.*, 49, 3937–3957.

LOS AUTORES

Carolina Lauro Ingeniera en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Cuyo. Doctora en Ingeniería de la Universidad Nacional de Rosario. Es Investigadora asistente de CONICET y trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación se refieren a Recursos hídricos superficiales. Regionalización de variables hidrológicas extremas: sequías, inundaciones. Variabilidad hidrológica y relación con el cambio climático.

Alberto I. J. Vich Ingeniero en Recursos Hídricos. Magister en Ciencias, Especialidad Edafología. Investigador adjunto de CONICET y trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Profesor de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Cuyo. Sus principales líneas de investigación se refieren a Riesgo aluvional. Análisis de procesos

hidrológicos. Modelación matemática. Fenómenos hidrológicos extremos. Erosión hídrica. Regionalización de variables hidrológicas. Gestión integrada de los recursos hídricos.

Sebastián Otta Ingeniero en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Cuyo. Becario doctoral de CONICET y trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación son: usos de la tierra. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Adaptación al Cambio Climático.

Stella Maris Moreiras Licenciada en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional de San Juan. Dra. en Ciencias Geológicas. Investigadora Independiente de CONICET. Profesora Adjunta de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Cuyo. Experiencia en Cuaternario, Deslizamientos y Geomorfología. Sus principales líneas de investigación comprenden los campos de la estratigrafía cuaternaria, paleosismología, neotectónica, peligros naturales, aluviones catastróficos por rompimiento de diques naturales glaciares o represados por deslizamientos y cambios ambientales recientes.

Emilce Vaccarino Geógrafa Profesional de la Universidad Nacional de Cuyo. Becaria doctoral de CONICET, trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación son: sequías hidrológicas, recurrencia de eventos hidrológicos, distribución espacio/temporal y apreciación social de eventos de sequías.

Luis Bastidas Geógrafo de la Universidad de Los Andes, Venezuela. Estudiante de la Maestría en Desarrollo de Aguas y Tierras, mención Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos. Centro Interamericano de Investigación Ambiental y Territorial CIDIAT. Universidad de los Andes. Becario doctoral CONICET, trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación son: caudales ambientales, conservación de humedales, variabilidad y cambio climático.

El recurso hídrico asociado a lagos en los Andes Centrales de Argentina (31°-36° S)

The water resource associated with lakes in the Central Andes of Argentina (31°-36° S)

 <https://doi.org/10.48162/rev.40.008>

Mariana Correas-Gonzalez  orcid.org/0000-0002-3557-0674

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales,
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 mcorreas@mendoza-conicet.gob.ar

Stella Maris Moreiras  orcid.org/0000-0001-6462-6684

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales,
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo
 moreiras@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Los lagos de montaña son valiosos recursos naturales dado que pueden ser aprovechados como reservas de agua dulce, atractivos turísticos y permiten el desarrollo de ecosistemas naturales de altura. En el contexto del Cambio Climático Global, se prevé un aumento de la cantidad, extensión y volumen de los lagos asociada a la fusión glaciar. Numerosos inventarios de lagos se han realizado en las diferentes regiones del mundo a fin de conocer la evolución de los cuerpos de agua, aunque con un enfoque mayormente ligado a estudios de peligrosidad. El objetivo del presente trabajo fue identificar, inventariar y clasificar los lagos existentes en los Andes Centrales de Argentina (31° - 36° S) en función de su represamiento y cuantificar su volumen para evaluar la reserva hídrica existente. Para ello, procesamos imágenes satelitales Landsat del año 2020 en un entorno SIG. Los cuerpos de agua fueron identificados en base al cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) e interpretación visual y fueron digitalizados de manera manual. El cálculo de los volúmenes se realizó por medio de relaciones empíricas área-volumen. Nuestros resultados revelan un total de 641 lagos cuyo volumen total

se ha estimado en 1.345,6 hm³. Este recurso hídrico preservado en la alta montaña no está asociado exclusivamente a lagunas de origen glaciar. Diferentes tipos de cuerpos lacustres prevalecen en cada cuenca en función de sus características intrínsecas. Así, los lagos asociados a morenas y represados por deslizamientos son más importantes en término de volumen entre los 31° - 32° S, mientras que en los 33° S predominan pequeñas lagunas asociadas a facies de termokarst de glaciares cubiertos. A los 34° S la Laguna del Diamante concentra más de cuatro quintas partes del volumen total estimado, mientras que, entre los 34° y 36° S, los cuerpos de agua parecen estar más forzados por la geología, presentando mayor diversidad en cuanto a tipos y volúmenes más importantes.

PALABRAS CLAVE: génesis de lagos, inventario de lagos, lagos de altura, alta montaña, diques naturales

ABSTRACT

Lakes are valuable natural resources since they can be used as freshwater reserves and tourist attractions while allowing the development of natural high-altitude ecosystems. In the context of Global Climate Change, an increase in the number, size, and volume of these lakes is expected due to glacier melting. Many lake inventories have been done in the world in order to know the evolution of these water bodies, although they were mostly done from a hazard approach. This study aimed to identify, inventory, and classify existing lakes in the Central Andes of Argentina (31 – 36° S) according to their damming process and quantify their volume to evaluate the existing water reserve. For this purpose, we processed Landsat satellite images from the year 2020 in a GIS environment. Lakes were identified utilizing the Normalized Difference Water Index (NDWI) and visual interpretation, and we digitalized them with a manual approach. Volume estimation was done using area-volume empiric relations. Our results reveal a total of 641 lakes whose total volume has been estimated at 1,345.6 hm³. This water resource preserved in the high mountain is not exclusively related to glacier lakes. Different types of water bodies prevail in each region according to their inner characteristics. Thus, moraine-dammed lakes and landslide-dammed lakes are more critical in terms of volume contribution between 31° - 32° S, while at ~33° S, small glacial lakes linked to thermokarst facies over debris-covered glaciers prevail. At ~34° S, the Laguna del Diamante lake represents more than four-fifths of the total volume estimated; while between 34° to 36° S water bodies seem to be forced by geology, presenting a wider lake's type diversity and significant volumes.

KEY WORDS: lakes origin, lake inventory, mountain lakes, high mountains, natural dams

INTRODUCCIÓN

Los lagos de montaña constituyen un valioso recurso natural, son aprovechados como reservas de agua dulce y como puntos de recreación o atractivos turísticos. Desde un punto de vista ambiental, permiten el desarrollo de ecosistemas naturales de altura (Catalan et al., 2006; Haeberli et al., 2016). En el contexto del Cambio Climático Global (CCG), numerosas transformaciones se han producido en los ambientes de montaña y, de modo general, destaca la elevación de la isoterma de 0°C y el derretimiento de las grandes masas de hielo glaciar generando un mayor número de lagos, así como también un aumento en su área y volumen (Carrivick y Tweed, 2013; Shugar et al., 2020). A su vez, el retroceso glaciar y la degradación del permafrost promueve la desestabilización de laderas rocosas (Clague et al., 2012) aumentando la susceptibilidad de procesos de remoción en masa capaces de bloquear un valle y generar un lago aguas arriba (Costa y Schuster, 1988; Korup y Tweed, 2007). En este marco, numerosos inventarios de lagos se han realizado en las diferentes regiones del mundo a fin de conocer la evolución de los cuerpos de agua (Gardelle et al., 2011; Mergili et al., 2013; Cook et al., 2016; Emmer et al., 2016; Buckel et al., 2018), la peligrosidad de crecidas abruptas asociada a los mismos (Emmer et al., 2014; Aggarwal et al., 2017; Emmer et al., 2020) y su vinculación con el CCG (Bajracharya et al., 2007; Clague et al., 2012; Haeberli et al., 2008; Harrison et al., 2018; Shugar et al., 2020). En la región de los Andes Centrales, investigaciones recientes abordan la génesis, distribución espacial y evolución temporal de los lagos de origen estrictamente glaciar (Wilson et al., 2018) así como el análisis de procesos y eventos peligrosos asociados a la criósfera (Iribarren Anacona et al., 2015). Sin embargo, otros tipos de lagos no han sido estudiados con igual nivel de detalle, y solo han sido abordados de manera puntual como resultado de las características catastróficas de su vaciamiento repentino (ej. lago Los Erizos, represado por un deslizamiento, estudiado por D’Odorico et al., 2009; Perucca y Esper Angillieri, 2009; Penna et al., 2013) o como resultados secundarios de investigaciones cuyo principal objeto de estudio no eran los lagos en sí mismos. Así, Trombotto Liaudat et al. (2012) reportan la existencia de un lago represado por un glaciar cubierto en la quebrada del río Colorado (32° 57’ S, 69° 34’ W) y estudios enfocados en inventarios de procesos de remoción en masa dan cuenta de la formación y colapso parcial de la laguna Baya represada por una avalancha de rocas en las nacientes del arroyo de los

Guanacos (Espizúa y Bengochea, 2002; Koslowski y Folguera, 2009). Un caso aparte constituye el lago temporario del Plomo que, formado por el avance extraordinario del glaciar (*surging glacier*) homónimo, produjo el represamiento del río del Plomo en reiteradas ocasiones en tiempos históricos, así como también un evento catastrófico de vaciamiento repentino en 1934 y otros de menor magnitud en 1985, razón por la cual ha sido ampliamente estudiado (King, 1934; Helbling, 1935; Prieto, 1986; Bruce et al., 1987; Espizúa y Bengochea, 1990; Correas-Gonzalez et al, 2020). Por último, las bases de datos geoespaciales de organismos oficiales como la del Instituto Geográfico Nacional (disponible en <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>) reportan solo algunas decenas de lagos en el área de estudio. En síntesis, la información referida a lagos se encuentra, o bien fragmentada en estudios de caso puntuales, o bien restringida a un tipo exclusivo de lagos; evidenciando la falta de un inventario a nivel regional que abarque todos los cuerpos lacustres existentes.

El presente trabajo tuvo dos objetivos principales: a) identificar, inventariar y clasificar los lagos existentes en los Andes Centrales de Argentina (31º - 36º S) en función de su represamiento y b) estimar el volumen de agua almacenado en los mismos para evaluar la reserva hídrica asociada. Para ello, se empleó un enfoque semi-automatizado basado en el cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) sobre imágenes satelitales Landsat del año 2020 y supervisado con interpretación visual, lo que permitió identificar los lagos. La digitalización de los mismos se realizó de manera manual y el cálculo de los volúmenes se realizó por medio de relaciones empíricas área-volumen. Nuestros resultados revelan un total de 641 lagos cuyo volumen total se ha estimado en 1.345,6 hm³. Este trabajo constituye el primer censo global de lagos en el área de estudio y un aporte para la estimación del recurso hídrico asociado a los mismos en la región de los Andes Centrales. Este recurso lacustre cobra vital importancia para los ecosistemas de altura y para el sistema de recarga de los ríos como para las comunidades andinas, por lo que recomendamos fuertemente su protección y el estudio periódico de los mismos a fin de evaluar su evolución.

Área de estudio

El área de estudio se extiende desde los 31° S al norte hasta los 36°S al sur; y desde la cota de 2.000 m snm al este hasta el límite con Chile al oeste, abarcando parte de las provincias de San Juan y Mendoza. Comprende la vertiente oriental de los Andes Centrales (31° - 36° S) según la regionalización climático – glaciológica propuesta por Liboutry (1998) y modificada por Masiokas et al., (2009). Esta porción de los Andes se caracteriza por presentar una altura media de 3.500 m snm, con un marcado gradiente altitudinal hacia el sur y con las máximas alturas en la porción septentrional (Cº Mercedario, 6.770 m snm; Cº Aconcagua, 6.961 m snm) (**Figura 1**).

El clima del área de estudio es del tipo polar de tundra (ETH) y polar de hielos eternos (EF) en las zonas de mayor altura de acuerdo a la clasificación climática de Köppen actualizada por Peel et al. (2007). En el clima ETH la temperatura media del mes más cálido está entre 0°C y 10°C, mientras que en el tipo EF la temperatura media del mes más cálido no supera los 0°C. El régimen de precipitaciones es nival y está ligado al dominio de las masas de aire húmedo provenientes del Anticiclón del Pacífico Sur que ejercen mayor influencia en los meses invernales. El sector norte (~ 31°S) registra precipitaciones cercanas a los 100 mm anuales y al sur de los 32°S se produce un marcado gradiente este – oeste de las isohietas hasta alcanzar ca. 800 mm anuales a los ~ 35°S (Viale y Nuñez, 2011)(**Figura 2**).

Las condiciones climáticas descritas y la topografía montañosa favorecen la existencia de un sistema de glaciares que cubre aproximadamente 1.696 km² en las cabeceras de las cuencas (IANIGLA-ING, 2018). En general, los glaciares de la región han experimentado un marcado retroceso asociado a un aumento de las temperaturas y una mayor tasa de ablación, situación agravada por la reducción en las precipitaciones invernales (Masiokas et al., 2009). Por otra parte, el dominio periglacial se extiende sobre la isoterma de 0°C a los 3.735 (+/- 197) m snm (Trombotto, 2003; Drewes et al., 2018; Tapia Baldis y Trombotto, 2015). Se distinguen siete cuencas hidrográficas caracterizadas por un régimen fluvial nivoglacial asociado a la fusión del manto nival y el aumento de las temperaturas durante la primavera y el verano (Lauro et al., 2019). En años secos la fusión glaciar sería particularmente importante para mantener los caudales de los ríos (Masiokas et al., 2013).

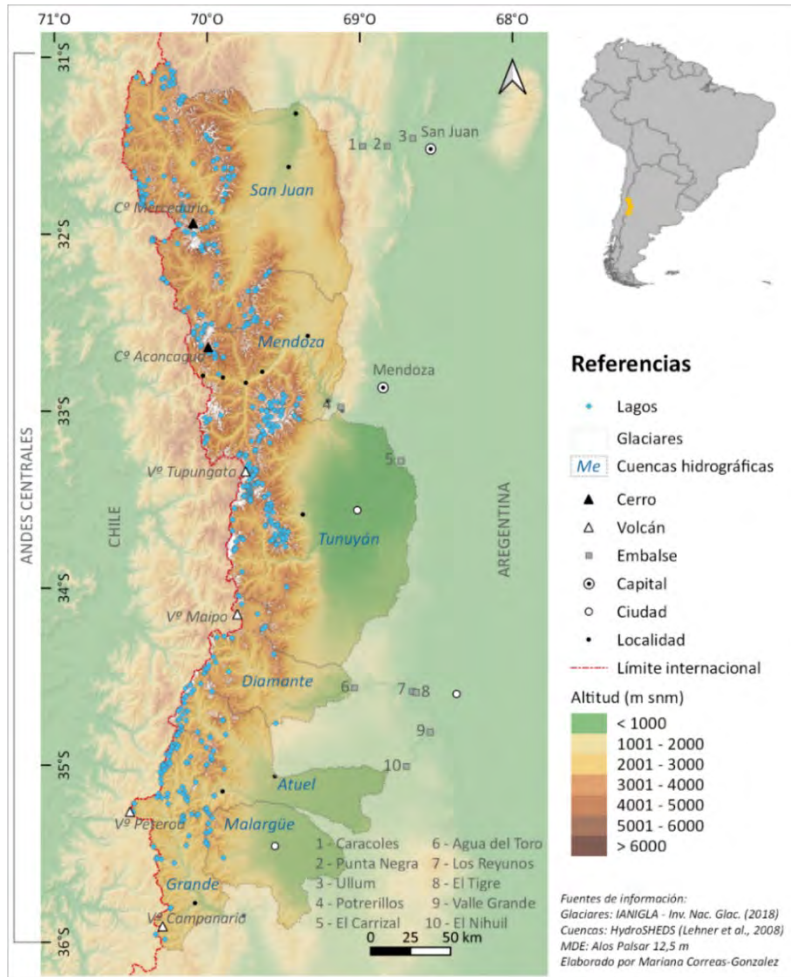


Figura 1. Localización del área de estudio que muestra la Cordillera de los Andes con la ubicación de los lagos identificados y las cuencas hidrográficas de los principales ríos. El área inventariada corresponde a la vertiente oriental de los Andes que coincide con el límite internacional al oeste y hasta la cota de 2.000 m snm al este. Se indican las principales ciudades y embalses de agua.

Entre los 28° - 33° S existe una importante actividad tectónica asociada a la subducción sub-horizontal de la placa de Nazca con registros de sismos históricos de

intensidad > 7 en la escala de Mercalli Modificada (Moreiras y Páez, 2015). Al sur de los 33° S, con una subducción normal, aparece la actividad volcánica (Ramos, 1999) (**Figura 1**). Esta actividad tectónica ha favorecido la generación de deslizamientos que bloquearon los valles, obstruyendo el normal flujo de los ríos y generando lagos aguas arriba (Moreiras et al., 2012).

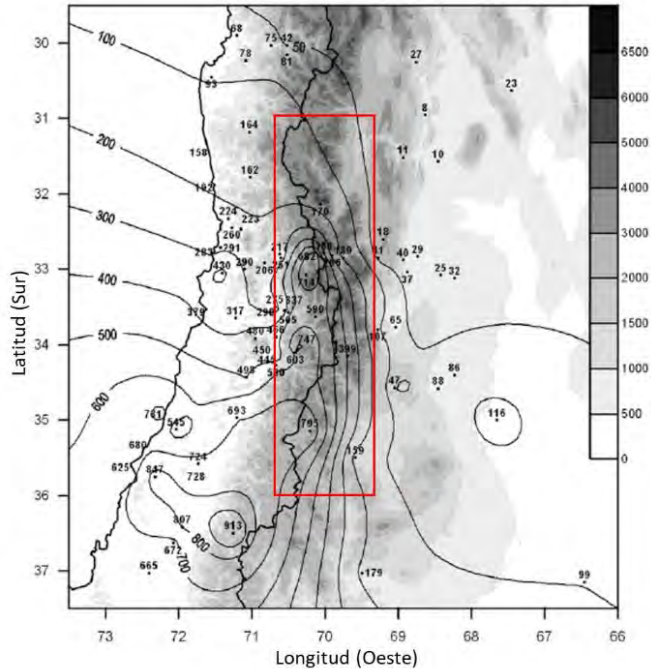


Figura 2. Distribución de las precipitaciones invernales en la región de los Andes Áridos Centrales (31-36°S). El recuadro rojo indica aproximadamente el área de estudio. Tomado y modificado de Viale y Nuñez (2011).

Las provincias de San Juan y Mendoza albergan una población total de 2,4 millones de habitantes (INDEC, 2010), concentrada mayormente en las ciudades capitales; mientras que en el sector de montaña la población se agrupa en localidades emplazadas en los fondos de los valles en coincidencia con la traza de las principales rutas. El corredor bioceánico (RN 7) atraviesa el valle del río Mendoza, es la principal vía de circulación y concentra el 65% del transporte terrestre de la región (BID, 2010).

Esta ruta alberga el paso fronterizo de Los Libertadores que junto con el paso Pehuenche (RN 226) constituyen las únicas vías de comunicación terrestres con Chile dentro del área de estudio. En general, el territorio se organiza en función de la disponibilidad del recurso hídrico a partir de oasis productivos (Zamorano, 2008). Existen diez embalses que son claves para el abastecimiento de agua y la generación hidroeléctrica (**Figura 1**).

MATERIALES Y MÉTODO

Identificación y delimitación de los lagos

El inventario de lagos se realizó de manera manual empleando imágenes satelitales Landsat 8 para el año 2020 (**Tabla 1**). Se seleccionaron imágenes correspondientes a los meses estivales a fin de evitar la cobertura nival. Las mismas fueron descargadas del sitio web <https://earthexplorer.usgs.gov/> de la United States Geological Survey (USGS, por sus siglas en inglés). Los límites de las cuencas hidrográficas corresponden al proyecto HydroSHEDS (Lehner et al., 2008) disponibles en <http://www.hydrosheds.org>.

Fecha	Número ID imagen	Path/Row	Cobertura nubosa (%)
23-03-2020	LC82320822020083LGN00	232/082	0,01
	LC82320832020083LGN00	232/083	0,14
	LC82320842020083LGN00	232/084	0,44
	LC82320852020083LGN00	232/085	0,59
27-02-2020	LC82330822020058LGN00	233/082	2,34
	LC82330832020058LGN00	233/083	13,23

Tabla 1. Listado de escenas Landsat 8 OLI (resolución espacial de 30 x 30 m) utilizadas en este estudio.

Los lagos fueron identificados en base a la inspección visual de las imágenes satelitales complementada por el cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado o *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Este índice facilita la diferenciación de

los cuerpos de agua de otras superficies basándose en el contraste de las firmas espectrales de los diferentes materiales (agua, hielo, etc.) en las distintas bandas de una imagen satelital multiespectral. Se empleó el índice NDWI propuesto por Huggel et al. (2002) detallado en la Ecuación 1 que utiliza las bandas espectrales del azul e infrarrojo cercano dado que en ellas se registran la máxima y mínima reflectancia del agua respectivamente.

$$NDWI = (B_{NIR} - B_{Blue}) / (B_{NIR} + B_{Blue})$$

Ecuación 1

Dónde: B_{NIR} corresponde a la banda del infrarrojo cercano; B_{Blue} es la banda del azul. Como resultado, se obtiene un raster en el que los píxeles correspondientes a cuerpos de agua aparecen indicados con valores de reflectancia que oscilan entre -0,60 y -0,85 (Huggel et al., 2002), aunque para el área de estudio se han observado valores que ascienden hasta -0,20, posiblemente asociado a lagos poco profundos. Para facilitar la comprobación visual de la clasificación obtenida, se realizó el refinado pancromático de las imágenes a fin de mejorar su resolución espacial de 30 a 15 m y se empleó un mapa de relieve sombreado elaborado a partir del MDE Alos Palsar (12,5 m) para descartar que pendientes sombrías fueran clasificadas como lagos. La superficie mínima mapeada es de 900 m² en base a la identificación de un pixel puro de 30 x 30 m indicado como agua por medio del NDWI. El procesamiento de las imágenes satelitales, los análisis realizados y la cartografía obtenida se realizó con el programa de libre acceso QGIS 3.10.6.

Clasificación de los lagos

Los lagos se clasifican usualmente en función de su localización, así como también de los procesos asociados a su formación. Típicamente, se reconocen tres clases principales de lagos en función del tipo de represamiento, a saber, lagos represados por deslizamientos, por glaciares o por morenas (Costa y Schuster, 1988). Esta clasificación de base ha sido adaptada a las diferentes regiones del mundo y se han agregado nuevas clases acorde a las particularidades de cada región (Korup y Tweed, 2007; Gardelle et al., 2011; ICIMOD, 2011; Emmer et al., 2015, 2016; Wilson et al., 2018). En este trabajo, los cuerpos de agua fueron clasificados según el tipo de

represamiento (**Figura 3**) agregando nuevas clases y subtipos en función de las características regionales.

A cada lago se le asignó un identificador único (ID) y se calcularon las siguientes variables: altitud, latitud, longitud, cuenca, superficie y volumen. El cálculo del área y de la altitud se realizó en base al MDE Alos Palsar. Por último, se realizó un chequeo en campo de algunos lagos a fin de verificar la clasificación realizada. Los lagos revisados fueron Laguna Blanca (31° 50'S, 69° 58'W), Horcones (32° 48'S, 69° 56'W), Diamante (34° 10'S, 69° 41'W), Atuel (34° 33'S, 70° 5'W), Las Orejas (35° S, 70° 18'W), Escondida (35° 6'S, 70° 7'W), Valle Hermoso (35° 9'S, 70° 12'W), Las Cargas (35° 10'S, 70° 19'W), Baya (35° 59'S, 70° 21'W) y Pehuenche (35° 58'S, 70° 25'W).

Cálculo de volúmenes

Finalmente, para la estimación del volumen en este trabajo empleamos un modelo empírico propuesto por Cook y Quincey (2015). Si bien esta relación fue determinada para lagos glaciares, aquí la hemos aplicado a todos los tipos de lagos inventariados, a fin de aproximar *grosso modo* el volumen contenido en los lagos (esta y otras limitaciones son abordadas en profundidad en la sección Discusión).

$$V = 2 \times 10^{-7} A^{1,3719} \quad (r^2 = 0,91) \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde V corresponde al volumen del lago (en millones m^3) y A al área (en m^2).

Clase	Definición	Sub-clase	Ref.
Lago glaciar (LG)	Represado por un glaciar de escombros	LGE	a
	Represado por un glaciar cubierto	LGC	b
	Represado por un glaciar descubierta	LGD	c
	Represado por un glaciar en surgencia	LGS	d
	Supraglaciar de termokarst	LST	e
Lago asociado a una morena (LM)	Represado por una morena lateral o frontal	LM	f
	Formado sobre la superficie <i>hummocky</i> de la morena	LHM	g
Lago asociado a erosión glaciar (LB)	Represado por una barra rocosa o afloramiento erosionado por el glaciar	LB	h
Lago represado por deslizamiento (LD)	Represado por un deslizamiento	LD	i
	Represado por flujos de detritos (abanico aluvial o coluvial)	LDT	j
Lago kárstico (LK)	Formado por disolución de rocas carbonáticas o yesíferas	LK	k
Lago volcánico (LV)	Represado por una colada de lava	LV	l
Lago mixto (LMX)	Dos o más elementos retienen el agua del lago	LMX	m

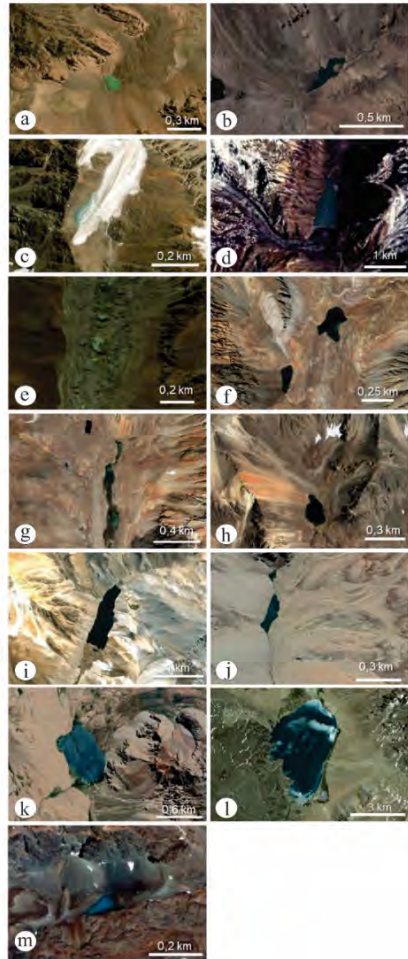


Figura 2. Clasificación de lagos propuesta según su represamiento e imágenes ejemplificativas de cada subtipo. Nótese que las imágenes están fuera de escala.

RESULTADOS

Distribución de los lagos por cuenca

El inventario de lagos de los Andes Centrales de Argentina (31°-36° S) arrojó un total de 641 cuerpos de agua para el año 2020. Los lagos identificados sumaron una superficie total de 24,78 km² y un volumen aproximado de 1.345,59 hm³. Todos los resultados aquí referidos corresponden al fin del verano del año 2020.

En la **Figura 4** se presenta la distribución de los cuerpos de agua teniendo en cuenta la tipología de lago y los volúmenes correspondientes a cada uno de ellos. Entre los 31°-32° S todos los tipos de lagos están presentes, a excepción del tipo kárstico (LK), y existe al menos una decena de lagos cuyos volúmenes oscilan entre 1 y 3,4 hm³. En la franja correspondiente a los 32°-34° S se observa un predominio de pequeños lagos tipo LST (0,001 a 0,029 km²) cuyo volumen promedio es 0,04 hm³. A los 34° S destaca la presencia de un único lago de origen volcánico (Laguna del Diamante) cuyo volumen representa el máximo identificado en la zona (1.152,7 hm³). Por último, al sur de los 34° S se observa nuevamente una diversificación de los tipos de lagos y una mayor frecuencia de lagos cuyos volúmenes se encuentran comprendidos entre los 3,4 a 15,1 hm³ y los 15,1 a 28,3 hm³. La **Figura 4.a** indica el volumen acumulado en cada tipología de lago. Destaca que los lagos tipo LV aportan el 87,7% del volumen total, de los cuales 85,7 % corresponden a la Laguna del Diamante. Las demás clases representan en conjunto el 12,3% del volumen total, correspondiendo a los lagos represados por deslizamientos un volumen de 56,4 hm³ (4,19 %) seguido de los represamientos por morenas con 43,38 hm³ (3,22 %) y los lagos de tipo kársticos con 31,1 hm³ (2,31 %). Por último, las tipologías de lagos LB, LG y LMX computan un volumen total de 34,58 hm³ que representa 2,57% del volumen global.

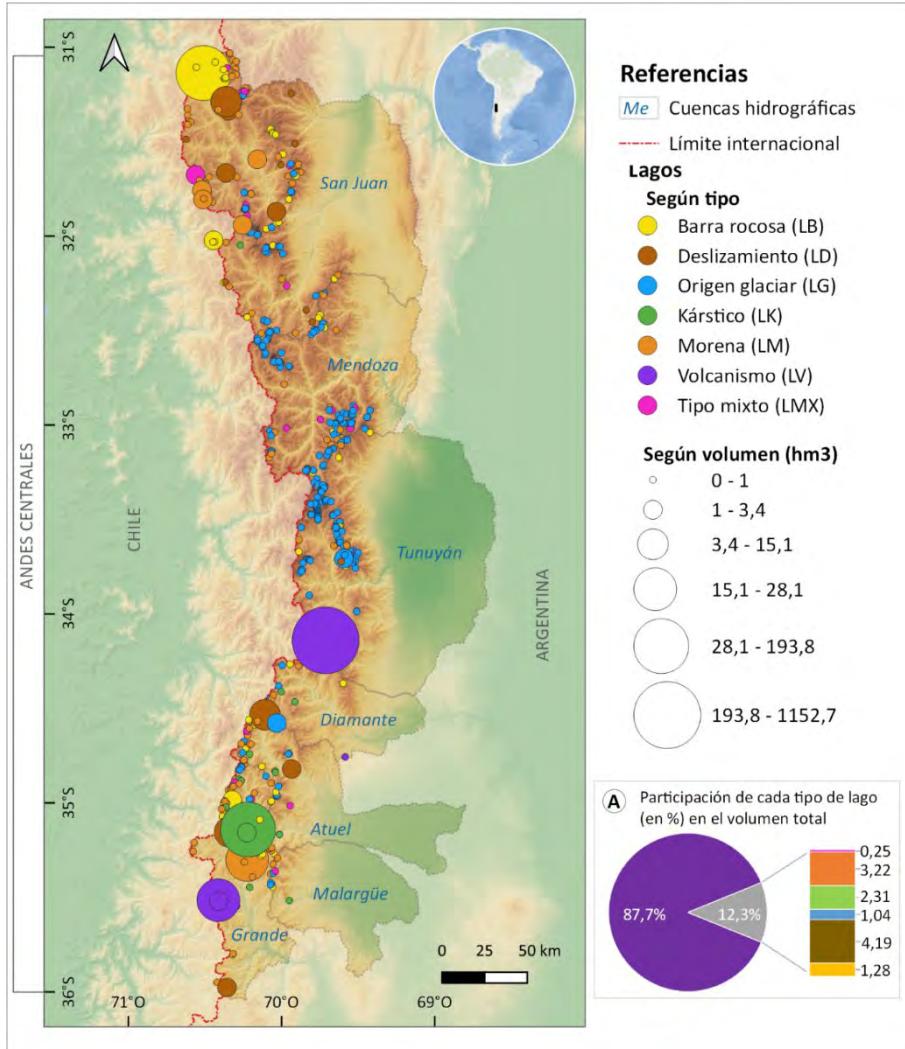


Figura 3. Distribución de las lagunas identificadas en los Andes Centrales de Argentina según tipo y volumen.

Relaciones inversas se encuentran cuando se analiza el número de lagos existentes en cada cuenca con respecto a los volúmenes represados. Así, las cuencas de los ríos que presentan la mayor cantidad de lagos no represan los mayores volúmenes de agua en sus lagunas (**Figura 5**). Los lagos de las cuencas de los ríos San Juan, Tunuyán y Mendoza albergan 47,94 hm³ (3,56 %); 9,61 hm³ (0,71 %) y 5,81 (0,43 %) hm³, respectivamente, implicando pequeños porcentajes dentro del volumen total. En cambio, en forma contrastante, las cuencas de los ríos Grande (N = 98) y Atuel (N = 45) poseen volúmenes más significativos estimados en 106,11 hm³ (7,89%) y 20,34 hm³ (1,51%) respectivamente y ganan relevancia al presentar mayores volúmenes de agua con un menor número de lagos. Por último, destaca nuevamente la importancia de la laguna del Diamante en la cuenca homónima. Sin embargo, este análisis referido al volumen de lago por cuenca debe tomarse con precaución, ya que las superficies de las cuencas son muy variables, en un rango que va de 15.545,6 km² (cuenca del río San Juan) a 4.940,6 km² (cuenca del río Grande).

Si se analiza la distribución relativa de cada tipo de lago por cuencas (**Figura 5**), se observa que los mismos resultan principalmente de origen glaciar (LG) en las cuencas de los ríos Tunuyán (N = 146; 88 %) y Mendoza (N = 106; 79,1 %); mientras en las cuencas de los ríos Atuel y Grande predominan los lagos represados por morenas (LM) con 17 (37,8 %) y 47 (48 %) ejemplares, respectivamente. Un caso distinto es la cuenca del río San Juan donde el número de lagos represados por glaciares (N = 57; 32,6 %) o morenas (N = 59; 33,7 %) es similar y los lagos represados por deslizamientos (LD) representan el 6,28 % del total de la cuenca. En tanto, en la cuenca del río Diamante y al sur de lo 34º S, los cuerpos de agua parecen estar más forzados por la geología ya que se asocian a los niveles jurásicos evaporíticos de la cuenca Neuquina y los complejos volcánicos, dando lugar a la aparición de lagos kársticos (LK) y volcánicos (LV) respectivamente. Por último, los lagos represados por una barra rocosa (LB) asociados a erosión glaciar son más numerosos en las cuencas de los ríos San Juan (N = 37; 21,1%) y Grande (N = 18; 18,3%).

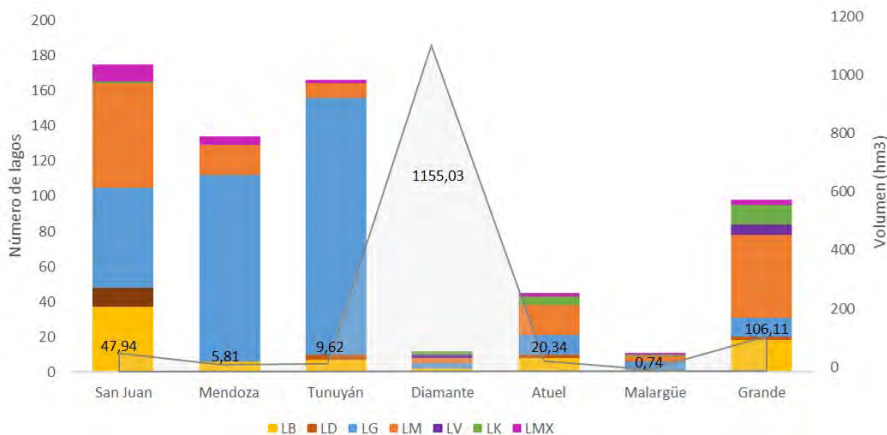


Figura 4. Distribución relativa de los lagos por tipo y cuenca. La línea gris indica el volumen de agua acumulado por cuenca.

Distribución de los lagos según tipo de represamiento

El volumen de agua retenido por tipo de lago no depende de la frecuencia de cuerpos de agua observada para cada tipo (**Figura 6**). Así, si bien, los lagos de origen glaciar (LG) son los más importantes en cantidad, no son los que retienen los mayores volúmenes de agua. Esto se debe principalmente a que en esta categoría se han incluido los lagos asociados a las facies de termokarst que se caracterizan por tener pequeñas dimensiones. En contraste, una pequeña cantidad de lagos volcánicos (LV) representa el mayor volumen de agua retenido, debido fundamentalmente a la envergadura de la Laguna del Diamante. Por otra parte, se observa que los lagos represados por deslizamientos (LD), en el sexto lugar en el ranking según número de lagos, retienen un volumen de agua más importante que cada una de las categorías de lagos que reportan mayor frecuencia: lagos represados por morenas (LM), lagos represados por una barra rocosa (LB), lagos mixtos (LMX) y lagos kársticos (LK). Dejando de lado los lagos volcánicos, los lagos represados por deslizamientos representan una tercera parte del volumen total.

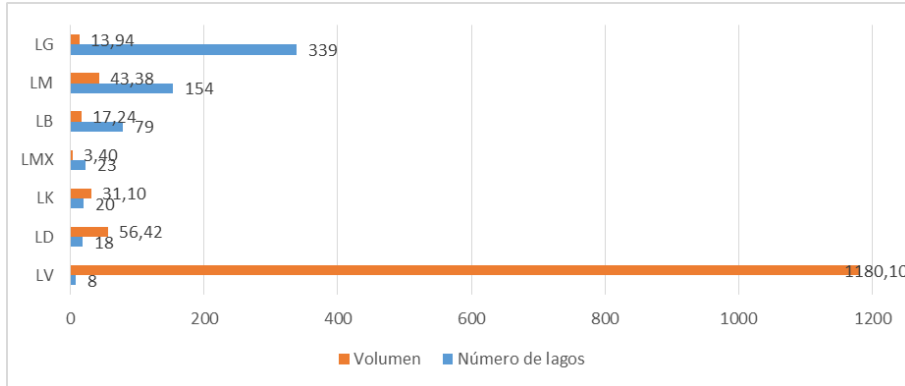


Figura 5. Número de lagos y volumen (hm³) agrupado por tipo de represamiento para los Andes Centrales Argentina (31° - 36° S). Año 2020.

La distribución de los volúmenes por tipo de lago es muy heterogénea y se observa en general una asimetría positiva (**Figura 7**), siendo más marcada en los lagos represados por morenas (LM), kársticos (LK) y volcánicos (LV) ya que el volumen promedio (línea punteada paralela a la caja) es mayor que la mediana. En el caso de los lagos LV, se observa el valor atípico correspondiente a la Laguna del Diamante, afectando fuertemente el volumen promedio de este tipo de lagos. Algo similar sucede con los lagos LK, donde el volumen promedio de 1,55 hm³, es muy superior al volumen contenido por el 50% central de la población (entre 0,014 y 0,060 hm³). El 50% central de la población de lagos represados por deslizamientos (LD) presenta volúmenes entre 0,15 y 2,68 hm³, con una dispersión importante de las observaciones indicadas por las dimensiones de la caja, que se observan también para los lagos tipo LMX y más marcadamente para los lagos LV.

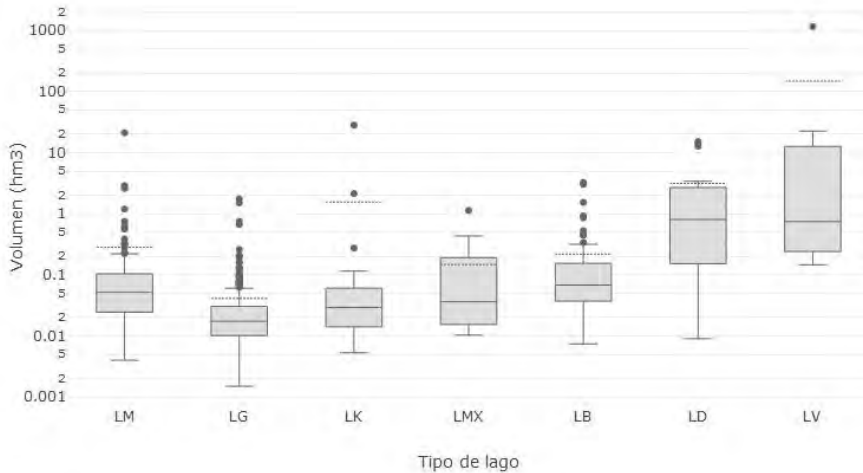


Figura 6. Diagrama de cajas y bigotes que muestra la variabilidad en la distribución de los volúmenes según tipo de lago. La línea punteada corresponde al promedio, los puntos a los valores extremos. Nótese que el eje de las ordenadas está en escala logarítmica.

Distribución altitudinal de los lagos

Respecto a la distribución altitudinal, 50% de los lagos se encuentra por encima/debajo de los 3.951 m snm, en un rango altitudinal de 2.004 m snm a 5.711 m snm. La mayor cantidad de lagos (N=249; 38,85%) se ubican en el rango de alturas de 4.000 a 4.500 m snm, seguidos en segundo lugar de importancia con una frecuencia de 142 (22,15%) para el rango altitudinal de 3.500 a 4.000 m snm (**Figura 8**). Por último, la altura promedio de los lagos es 3.978 m snm. Este análisis revela claramente la distribución de las lagunas en las zonas más altas de la cordillera en el dominio glaciar y periglacial de los Andes y destaca la importancia que tienen los lagos en los ecosistemas de altura donde el agua se encuentra en estado sólido durante los meses invernales y parte del otoño, pero en estado líquido durante el verano.

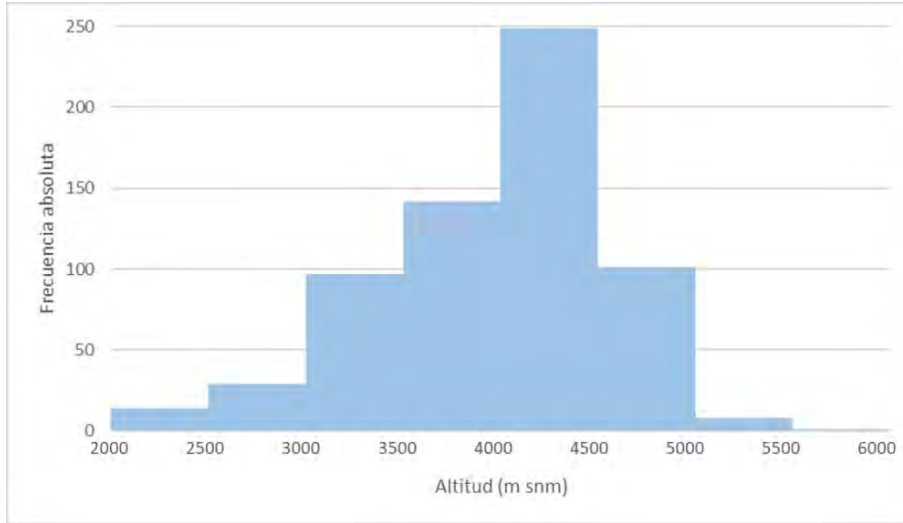


Figura 7. Histograma con la distribución de frecuencias de lagos según fajas altitudinales de 500 m entre los 2000 - 6000 m snm.

Relación lagos naturales vs. embalses artificiales

Poniendo en perspectiva el recurso hídrico asociado a lagos frente al agua contenida en embalses artificiales (**Figura 9a**), se observa que los primeros almacenan un volumen de agua equivalente al 41% del volumen contenido en los diez embalses artificiales más importantes de la región. Si se discrimina por cuencas (**Figura 9b**), se observa que el volumen contenido por lagos es importante para las cuencas de los ríos Grande y Malargüe ya que no poseen ningún embalse. Destaca claramente la cuenca del río Diamante que almacena en sus tres represas la mitad del volumen contenido en la Laguna del Diamante (LV). Para las demás cuencas, los lagos retienen pequeños volúmenes en relación a la cantidad de agua contenida en sus embalses.

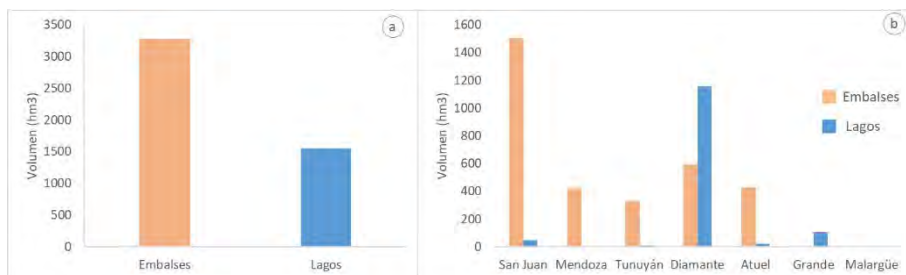


Figura 8. a. Volumen de agua contenido en embalses artificiales vs. lagos para los Andes Centrales de Argentina. b. Ídem, pero discriminando por cuenca. Fuente: Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP); Empresa Provincial Sociedad del Estado (EPSE) San Juan y este trabajo.

DISCUSIÓN

En la región de los Andes Centrales de Argentina, los lagos de montaña han sido tradicionalmente desestimados e ignorados. Ello se evidencia por ejemplo en que solo tres decenas de cuerpos de agua han sido identificados previamente en los mapas oficiales del IGN y/o en la falta de un inventario del recurso lacustre, a excepción del inventario de lagos glaciares desarrollado por Wilson et al., (2018). El presente trabajo busca remediar esta situación y aporta nuevos conocimientos acerca de la distribución espacial de los mismos en la vertiente oriental de los Andes entre los 31° y los 36°S.

Los resultados aquí presentados proveen el primer inventario general de lagos según su represamiento para la región enfatizando la importancia de conocer todos los cuerpos de agua existentes cuando se busca evaluar el recurso lacustre. El inventario de lagos clasificados en función del represamiento pone en evidencia la singularidad del ambiente de montaña en la región caracterizada por un extenso sistema de glaciares, una importante actividad tectónica y características geológicas únicas que condicionaron la génesis de los lagos existentes.

A nivel mundial, se observa un predominio de inventarios de lagos de origen estrictamente glaciar centrados principalmente en conocer su evolución espacio-temporal en el contexto del retroceso de los glaciares asociado al cambio climático (Gardelle et al., 2011; ICIMOD, 2011; Emmer y Vilímek, 2014; Iribarren Anacona

et al., 2015; Harrison et al., 2018; Shugar et al., 2020). Estos estudios ponen en evidencia la relación existente entre lagos glaciares y dinámica glaciar, incluyendo en algunos casos el análisis de los peligros naturales asociados a la criósfera y los posibles riesgos que implican para las sociedades. Sin embargo, en la región de los Andes Centrales se carecía de un inventario general de lagos que reconociera la importancia de otros tipos de represamientos no vinculados a glaciares, tales como los lagos volcánicos, de origen kárstico o represados por deslizamientos, que sí son contemplados en nuestro estudio.

El análisis de siete variables claves en los lagos estudiados (número; tipo de lago represado; área, volumen; distribución altitudinal, latitudinal y por cuencas) permitió caracterizar la distribución espacial de estos y estimar el recurso hídrico asociado a los mismos en función del tipo de lago y de su ubicación por cuenca. Reportamos en nuestro estudio un total de 641 lagos, que representan una superficie de 24,8 km² y un volumen estimado en 1.345,6 hm³. Este tipo de inventario no había sido realizado para la región con anterioridad, a excepción del único antecedente presentado recientemente por Wilson et al. (2018) que reporta un inventario de lagos de origen exclusivamente glaciar para la región de los Andes Centrales de Argentina y Chile. En dicho inventario los autores identificaron en base a imágenes satelitales Landsat del año 2016, un total de 313 lagos para ambas vertientes de los Andes, los cuales son agrupados en tres clases principales (lagos represados por morenas, por hielo glaciar o por una barra rocosa). Dichos lagos computaban un área total de 6,5 km² y un volumen equivalente a 73 hm³. Observando estos datos en relación con los reportados en nuestro estudio para las mismas categorías de lagos (LM, LG y LB) y solo en la vertiente oriental de los Andes, hemos identificado 572 cuerpos de agua que computan un área de 60,24 km² y un volumen 74,6 hm³. Si consideramos todos los lagos relevados en nuestro estudio, vemos que hemos hallado casi el doble, una superficie lacustre cuatro veces mayor y un volumen 18 veces superior; ampliando notablemente el conocimiento del recurso en la región.

Respecto al cálculo de los volúmenes, el modelo empírico propuesto Cook y Quincey (2015) es válido solo para lagos de origen glaciar cuyas áreas oscilen entre 28.000 y 19,5 x 10⁶ m², razón por la cual los volúmenes aquí calculados para otros tipos de

lagos (LD, LV, LK, LB y LMX) así como para aquellos cuerpos lacustres que se encuentran por fuera de los límites del modelo, son meramente descriptivos y deben ser tomados con sumo recaudo. Además, Cook y Quincey (2015) advierten que el uso del modelo empírico propuesto puede ser inadecuado para los casos de lagos supraglaciares, lagos represados por morenas y lagos originados por la obstrucción de un valle por el avance de un glaciar en surgencia. Sin embargo, dada la extensión del área de estudio (ca. 30.000 km²), el gran número de lagos inventariados y puesto que no existen estudios batimétricos en la región, se realizó el cálculo empírico a los fines de aproximar un volumen y poder comparar la importancia relativa de cada tipo de lago. Teniendo esto en consideración, es necesario destacar que del total de lagos inventariados solo un 3% (n = 19) cumple con los requisitos exigidos por el modelo para que los resultados sean válidos. Este subgrupo de lagos posee un volumen estimado en 116,21 hm³, de los cuales 0,36 hm³ corresponden a los de origen glaciar (LG) y 115,85 hm³ a los represados por morenas. De esto se desprende que 97 % de los lagos inventariados no cumple con los requisitos del modelo empírico empleado por lo que se recomienda a fines de establecer volúmenes más certeros, realizar estudios de detalle de batimetría. Esto debería hacerse en al menos uno o dos lagos de cada tipo a los fines de establecer una base de datos batimétricos que refleje las particularidades de los lagos existentes en la región.

Si bien hemos comparado los volúmenes almacenados en los lagos con relación a los embalses, este análisis es válido solo a los fines descriptivos y a fin de ilustrar la cantidad de agua retenida en los lagos con relación a los embalses. Sin embargo, cabe destacar que las posibilidades reales de aprovechamiento del agua contenida en las lagunas es muy limitada dada la dispersión y la ubicación remota de las mismas, mientras que los embalses han sido diseñados con el fin específico de almacenar el recurso en épocas de mayor escurrimiento a fin de redistribuirlo en épocas de escasez. No obstante, los cuerpos lacustres serían esenciales como reguladores naturales del recurso hídrico, así como para el sostenimiento de los ecosistemas andinos de altura.

Las regiones montañosas enfrentarán numerosas y variadas mutaciones asociadas al CCG, entre las que destaca la retracción de los glaciares y un aumento del número de lagos y sus volúmenes (Clague et al., 2012; Iribarren Anacona et al., 2015),

elevación de isoterma de 0°C y consecuente degradación del permafrost (Drewes et al., 2018) y mayor susceptibilidad de deslizamientos capaces de represar ríos (Haeberli et al., 2016), por lo que más investigación es requerida a fin de comprender mejor la evolución pasada y futura de los ambientes de montaña. En el área de estudio, una gran cantidad de lagos supraglaciares vinculados a glaciares con facies de termokarst (LST), concuerda o podría entenderse en el contexto del calentamiento global mientras que los lagos volcánicos (LV), kársticos (LK) y represados por deslizamientos (LD) se asocian puramente a la geología y tectónica de la región. No obstante, la ocurrencia de lagos tipo LD estaría asociada también al efecto de la deglaciación andina que favorece los colapsos de laderas (Moreiras et al., 2020).

Por otro lado, la (in)estabilidad de estos lagos está asociada no solo al contexto geomorfológico del cuerpo de agua, sino también de manera intrínseca al tipo de represamiento. En este sentido, Costa y Schuster (1988) sostienen que, de todos los tipos de lagos existentes, aquellos represados por deslizamientos, por hielo glaciar o por morenas son considerados los más peligrosos en cuanto a su potencial colapso total o parcial. En los Andes Centrales, la ocurrencia de crecidas abruptas asociadas al colapso de lagos glaciares (King, 1934; Helbling, 1935; Bruce et al., 1987; Correas-Gonzalez et al., 2020) y de lagos represados por deslizamientos (D'odorico et al., 2009; Kozlowski y Folguera, 2009; Perucca y Esper Angillieri, 2009; Penna et al., 2013) así como el extenso registro de procesos de remoción en masa (Espizúa y Bengochea, 2002; Moreiras, 2006; Jeanneret et al., 2018; Moreiras et al., 2021) pone de manifiesto la importancia de este tipo de procesos para la región. Teniendo esto en cuenta, el inventario de lagos según represamiento aquí presentado constituye un insumo clave para el desarrollo de futuras investigaciones orientadas a la identificación de lagos potencialmente peligrosos.

Finalmente, destacamos la importancia que representan los lagos para los ecosistemas de altura como para los sistemas de recarga a los ríos andinos que abastecen a los oasis productivos de la región cuyana. El conocimiento detallado y actualizado al año 2020 del recurso lacustre constituye un valioso aporte para sustentar las decisiones que se tomen a nivel gubernamental en lo que respecta a la gestión del recurso hídrico. Por ello, sería conveniente evaluar la posibilidad de

implementar nuevos y más eficientes mecanismos para almacenar el agua alterando en el menor grado posible el equilibrio de los ecosistemas y/o la continuidad ecológica de los ríos. Este hecho cobra vital importancia en la región de los Andes Centrales que se ha visto afectada por un marcado retroceso glaciar y una sequía extrema durante los últimos 10 años (Masiokas et al., 2009; Garreaud et al., 2017; Garreaud et al., 2019, Masiokas et al., 2020) poniendo en jaque el desarrollo de los oasis productivos en crecimiento que requieren necesariamente del aprovisionamiento del recurso hídrico para la producción agropecuaria, la generación de energía y el abastecimiento de la población. En vistas de ello, la preservación de los ambientes de montaña que albergan el recurso hídrico asociado a lagos surge como una necesidad primaria.

CONCLUSIONES

El inventario releva un total de 641 lagos, incluyendo numerosos cuerpos de agua que no habían sido incluidos en estudios previos o que estaban subrepresentados en los mapas oficiales, y contribuye al conocimiento del estado del recurso hídrico lacustre en los Andes Centrales de Argentina (31° – 36° S) para el año 2020. Los lagos cubren una superficie de 24,78 km² y se estimó un volumen total de 1.345,6 hm³, lo cual equivale aproximadamente al 42% del volumen almacenado en los embalses artificiales de la región. Este recurso hídrico preservado en la alta montaña no está exclusivamente asociado a lagos de origen glaciar. En primer lugar, es notorio que el lago volcánico de la Laguna del Diamante concentre el 85,7% del volumen total estimado. Por otra parte, si bien los lagos de origen glaciar (LG) representan el 52,9% (N = 339) del total de lagos inventariados, estos aportan el 1,03% (13,9 hm³) del volumen ya que una novena parte de los mismos corresponde a pequeños lagos supraglaciares asociados a facie de termokarst sobre glaciares cubiertos en proceso de degradación. En cambio, los lagos represados por deslizamientos (LD) constituyen 2,8% (N=18) de la población total de lagos y aportan un 4,2% (56,4 hm³) del volumen total, constituyendo el segundo tipo de lago en importancia en cuanto al volumen almacenado. Nuestros resultados constituyen el primer inventario global de lagos para la región de los Andes Centrales y destacan la importancia de los mismos tanto para los ecosistemas de altura como para el sistema de recarga de los ríos andinos. Este recurso hídrico cobra vital importancia en los ambientes de montaña por lo que

recomendamos fuertemente su protección a fin de preservar su función ecosistémica.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte de la tesis doctoral de M. Correas-Gonzalez quien cuenta con una beca doctoral de CONICET. El financiamiento para la investigación proviene del PIP 11220150100191CO cuyo investigador responsable es S. Moreiras. Las autoras queremos agradecer expresamente a Santiago Villar por acompañarnos a caballo en la campaña de 2020 y al Consorcio Las Leñas por permitir el acceso a las lagunas de Valle Hermoso. Extendemos nuestro agradecimiento al Ing. Rodolfo Iturraspe y a un revisor anónimo por las valiosas contribuciones que permitieron mejorar nuestro trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Aggarwal, S., Rai, S. C., Thakur, P. K. & Emmer, A. (2017). Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya. *Geomorphology*, 295 (Supplement C), 39-54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.014>

Bajracharya, S. R., Mool, P. K. & Shrestha, B. R. (2007). Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes: Case studies on GLOF and associated hazards in Nepal and Bhutan. International Centre for Integrated Mountain Development: Kathmandu.

Banco Interamericano de Desarrollo - BID. (2010). *Estudio binacional para la optimización del paso de frontera sistema Cristo Redentor*, [Resumen Ejecutivo]. Banco Interamericano de Desarrollo (p.29 Recuperado de: <https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/Resumen-Ejecutivo-Cristo-Redentor.pdf>

Bruce, R. H., Cabrera, G. A., Leiva, J. C., Lenzano, L. E. (1987). The 1985 surge and ice dam of Glaciar Grande del Nevado del Plomo, Argentina. *Journal of Glaciology*, 33, 131–132. doi: <https://doi.org/10.1017/S0022143000005475>.

Buckel, J., Otto, J. C., Prasicek, G. & Keuschnig, M. (2018). Glacial lakes in Austria—Distribution and formation since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 164, 39-51. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.03.003

Carrivick, J. L. & Tweed, F. S. (2013). Proglacial lakes: Character, behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews*, 78, 34-52.

Catalan, J., Camarero, L., Felip, M., Pla, S., Ventura, M., Buchaca, T., Bartumeus, F., de Mendoza, G., Miró, A., Casamayor, E. O., Medina-Sánchez, J. M., Bacardit, M., Altuna, M., Bartrons, M. & Diaz de Quijano, D. (2006). The mountain lakes of the Pyrenees. *Limnetica*, 25 (1-2), 33.

Clague, J., Huggel, C., Korup, O. & McGuire, B. (2012). Climate change and hazardous processes in high mountains. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 328-338. doi: <https://doi.org/10.5167/uzh-77920>

Cook, S. J. & Quincey, D. J. (2015). Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surface Dynamics*, 3(4), 559-575. doi: <https://doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015>

- Cook, S. J., Kougkoulos, I., Edwards, L. A., Dortch, J. & Hoffmann, D. (2016). Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. *The Cryosphere*, 10(5), 2399-2413. doi: <https://doi.org/10.5194/tc-10-2399-2016>
- Correas-Gonzalez, M., Moreiras, S. M., Jomelli, V., & Arnaud-Fassetta, G. (2020). Ice-dammed lake outburst flood risk in the Plomo basin, Central Andes (33° S): Perspectives from historical events. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(1), 223-249. <https://doi.org/10.18172/cig.4219>
- Costa, J. E. & Schuster, R. L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological society of America bulletin*, 100(7), 1054-1068. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2)
- D'odorico, P. E., Pérez, D. J., Sequeira, N., & Fauqué, L. (2009). El represamiento y aluvión del río Santa Cruz, Andes Principales (31° 40'S), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(4): 713-724.
- Drewes, J., Moreiras, S. & Korup, O. (2018). Permafrost activity and atmospheric warming in the Argentinian Andes. *Geomorphology*, 323, 13-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.005>
- Emmer, A. & Vilímek, V. (2014). New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3461-3479.
- Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. & Cochachin, A. (2014). Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordillera Blanca, Peru. En W. Shan, Y. Guo, F. Wang, H. Marui, & A. Strom (Eds.), *Landslides in cold regions in the context of climate change* (pp. 231-252). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_17
- Emmer, A., Merkl, S. & Mergili, M. (2015). Spatiotemporal patterns of high-mountain lakes and related hazards in western Austria. *Geomorphology*, 246, 602-616. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.032>
- Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V. & Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *Catena*, 147, 269-279.
- Emmer, A., Harrison, S., Mergili, M., Allen, S., Frey, H. & Huggel, C. (2020). 70 years of lake evolution and glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for the future. *Geomorphology*, 365, 107-178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107178>
- Empresa Provincial Sociedad del Estado - EPSE. Recuperado de: www.epsesanjuan.com.ar. Último acceso: 26 /07/2021
- Espizúa, L. E., & Bengochea, J. D. (1990). Surge of Grande del Nevado Glacier (Mendoza, Argentina) in 1984: Its Evolution through Satellite Images. *Geografiska Annaler*, 72A (3-4), 255-259. <https://doi.org/10.2307/521153>.
- Espizua, L. E., & Bengochea, J. D. (2002). Landslide Hazard and Risk Zonation Mapping in the Río Grande Basin, Central Andes of Mendoza, Argentina. *Mountain Research and Development*, 22(2), 177-185. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2002\)022\[0177:LHARZM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2002)022[0177:LHARZM]2.0.CO;2)

- Gardelle, J., Arnaud, Y. & Berthier, E. (2011). Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global and Planetary Change*, 75(1), 47-55. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.10.003>
- Garreaud, R.D.; Alvarez-Garretón, C.; Barichivich, J.; Boisier, J.P.; Christie, D.; Galleguillos, M.; Le-Quesne, C.; McPhee, J.; Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6307-6327, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>.
- Garreaud, R.D.; Boisier, J.P.; Rondanelli, R.; Montecinos, A.; Sepúlveda, H.H.; Veloso-Aguila, D. (2019). The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421-439, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.6219>.
- Haerberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Friedli, T. L., Schaub, Y. & Schleiss, A. J. (2016). New lakes in deglaciating high-mountain regions—opportunities and risks. *Climatic change*, 139(2), 201-214.
- Haerberli, W., Clague, J. J., Huggel, C. & Kääh, A. (2008). Hazards from lakes in high-mountain glacier and permafrost regions: Climate change effects and process interactions. *Avances de la Geomorfología en España, 2010*, 439-446.
- Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., Reynolds, J., Shugar, D. H., Betts, R. A., Emmer, A., Glasser, N., Haritashya, U. K. & Klimeš, J. (2018). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 12, 1195-1209. doi: <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>
- Helbling, R. (1935). The origin of the Río Plomo ice-dam. *The Geographical Journal*, 85(1), 41-49.
- Huggel, C., Kääh, A., Haerberli, W., Teysseire, P. & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 316-330. doi: <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Huggel, C., Clague, J. J. & Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1), 77-91
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. (2018). *Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares* (p. 27). IANIGLA-CONICET, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Recuperado de: http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=2571
- International Center for Integrated Mountain Development - ICIMOD. (2011). *Glacial lakes and glacial lake outburst floods in Nepal*. ICIMOD. pp. 109.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - INDEC (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010*. Argentina. Recuperado de: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>
- Iribarren Anaconda, P., Mackintosh, A. & Norton, K. P. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: Lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 2-21. doi: <https://doi.org/10.1002/esp.3524>
- Jeanneret, P., & Moreiras, S. M. (2018). Inventario de procesos de remoción en masa en la cuenca baja del Río Blanco (31°S), Andes Centrales Argentinos. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(3), 215-227. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.787>

- King, W. D. V. O. (1934). The Mendoza River Flood of 10-11 January 1934-Argentina. *The Geographical Journal*, 84(4), 321-326. <https://doi.org/10.2307/1786696>.
- Korup, O. & Tweed, F. (2007). Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain. *Quaternary Science Reviews*, 26(25-28), 3406-3422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.10.012>
- Kozłowski, E. N., & Folguera, A. (2009). Primer registro histórico de una avalancha de rocas en los Andes argentinos: Región de la laguna Baya en los Andes mendocinos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1), 233-235.
- Lauro, C., Vich, A. I. J. & Moreiras, S. M. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indices in western rivers of Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 64(5), 607-619. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>
- Lehner, B., Verdin, K. & Jarvis, A. (2008). *Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales* - HydroSHEDS. Recuperado de: <https://www.hydrosheds.org/>
- Lliboutry, L. (1998). Glaciers of South America. Glaciers of Chile and Argentina. En *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: Vol. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386*. USGS. <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386i/chile-arg/intro.html>
- Masiokas, M. H., Rivera, A., Espizua, L. E., Villalba, R., Delgado, S., & Aravena, J. C. (2009). Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3), 242-268.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Montaña, E., Betman, E., Christie, D., Le Quesne, C. y Mauget, S. (2013). Recent and historic Andean snowpack and streamflow variations and vulnerability to water shortages in central-western Argentina. En R. Pielke, *Climate Vulnerability*, Vol. 5, 213-227. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00522-0>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera Ibáñez, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussailant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Mergili, M., Müller, J. P. & Schneider, J. F. (2013). Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia). *Global and Planetary Change*, 107, 13-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.001>
- Moreiras, S. M. (2006). Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina: Associated risk and future scenario. *Quaternary International*, 158(1), 110-121.
- Moreiras S.M., Lauro C. & Mastrantonio L. (2012). Stability analysis and morphometric characterization of palaeo-lakes of the Benjamin Matienzo Basin- Las Cuevas River, Argentina. *Natural Hazards*, 62 (2): 593-611. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0095-7>
- Moreiras, S. M. & Páez, M. S. (2015). Historical damage and earthquake environmental effects related to shallow intraplate seismicity of central western Argentina. *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1), 369-382. doi: <https://doi.org/10.1144/SP399.6>

Moreiras, S. M., Jeanneret, P., Junquera, S., Correas-Gonzalez, M., & Moragues, S. (2020). Colapsos de morenas posiblemente asociados a la deglaciación pleistocena en los Andes Centrales de Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 77(1), 13.

Organismo Regulador de Seguridad de Presas - ORSEP. www.argentina.gob.ar/orsep/registro-de-presas-fiscalizadas/regional-cuyo-centro. Último acceso: 26 /07/2021

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Penna, I. M., Derron, M.-H., Volpi, M., & Jaboyedoff, M. (2013). Analysis of past and future dam formation and failure in the Santa Cruz River (San Juan province, Argentina). *Geomorphology*, 186: 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.011>

Perucca, L. P., & Esper Angillieri, M. Y. (2009). Evolution of a debris-rock slide causing a natural dam: The flash flood of Río Santa Cruz, Province of San Juan—November 12, 2005. *Natural Hazards*, 50(2): 305-320. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9341-4>

Prieto, M. del R. (1986). The glacier dam on the Rio Plomo: A cyclic phenomenon? *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 22(1), 73-78.

Ramos, V. A. (1999). Rasgos estructurales del territorio argentino. *Geología Argentina*, 29(24), 15-75.

Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Watson, C. S., Kennedy, M. C., Bevington, A. R., Betts, R. A., Harrison, S. & Strattman, K. (2020). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>

Tapia Baldis, C. C. & Trombotto, D. T. (2015). Cinturones altitudinales criogénicos en la cuenca del río Bramadero, San Juan, Argentina. *Acta geológica lilloana*. 27(2): 146-158.

Trombotto, D. (2003). Mapping of permafrost and the periglacial environments, Cordón del Plata, Argentina. En: *8th International Conference on Permafrost*. 161-162., 21-25 Julio de 2003. Zürich, Switzerland

Trombotto Liaudat, D., Lenzano, M. G., & Castro, M. (2012). Inventory and Monitoring of Rock Glaciers and Cryogenic Processes in the Central Andes of Mendoza, Argentina: Birth and Extinction of a Periglacial Lake. En K. M. Hinkel (Ed.), *Proceedings on the Tenth International Conference on Permafrost*: Vol. I, 419-424.

Viale, M. & Nuñez, M. (2011). Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12. doi: <https://doi.org/10.1175/2010JHM1284.1>

Wilson, R., Glasser, N. F., Reynolds, J. M., Harrison, S., Iribarren Anaconda, P., Schaefer, M. & Shannon, S. (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 162, 275-291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.004>

Zamorano, M. (2008). El nuevo Cuyo. En J. A. Roccatagliata (Ed.), *Argentina. Una visión actual y prospectiva desde la dimensión territorial*. (1.ª ed., pp. 542-588). Emecé. Buenos Aires.

LAS AUTORAS

Mariana Correas Gonzalez es Geógrafa por de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Cuyo y es Magister en Dinámica natural y riesgos por la Universidad de Paris Diderot (Paris VII). Actualmente es becaria doctoral de CONICET e integra el grupo de Geomorfología y Cuaternario del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Su tema de investigación es “Represamientos naturales y peligrosidad de crecida abrupta en los Andes Centrales de Argentina (31-36°S)” bajo la dirección de la Dra. Stella Moreiras y el Dr. Jan Klimes del Instituto de Estructura y Mecánica de Rocas de la Academia de Ciencias de República Checa. Resultados parciales de su investigación han sido publicados en revistas científicas internacionales, así como en congresos.


Stella Maris Moreiras es Licenciada en Ciencias Geológicas y Doctora en Ciencias Geológicas por la Universidad Nacional de San Juan. Profesora Adjunta de la cátedra de Edafología de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Cuyo. Investigadora Independiente de CONICET y líder del grupo de Geomorfología y Cuaternario del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) integrado por geólogos, geógrafos, geofísicos, ingenieros civiles, ingenieros en recursos naturales, antropólogos, arqueólogos y profesionales de otros campos. Posee amplia experiencia en Cuaternario, Deslizamientos y Geomorfología. Sus investigaciones comprenden los campos de la estratigrafía cuaternaria, paleosismología, neotectónica, peligros naturales, aluviones catastróficos por rompimiento de diques naturales glaciares o represados por deslizamientos y cambios ambientales recientes. Posee numerosas publicaciones en revistas científicas de primer nivel, internacionales y nacionales. Directora y Co-directora de Tesis doctorales y de grado.

Las formas jurídicas de las fuentes y reservas de agua en los Andes argentinos

Legal forms of water sources and reservoirs in the Argentine Andes

 <https://doi.org/10.48162/rev.40.009>

Mauricio Pinto  orcid.org/0000-0001-8281-5286

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo
 ticio2006@gmail.com

Liber Martin

Facultad de Derecho, Universidad Nacional de Cuyo
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 libermartin@hotmail.com

RESUMEN:

El artículo realiza un análisis crítico del marco jurídico de las fuentes y reservas de agua en los Andes a partir de la modificación del Código Civil y Comercial (2015), precisando la titularidad dominial del recurso hídrico en las distintas etapas de su ciclo, que incluyen a su vez la humedad atmosférica, las precipitaciones nievales y pluviales, la acumulación nival y glacial, el deshielo, el escurrimiento superficial, la acumulación hídrica en lagos y lagunas, la humedad del suelo, la percolación y formación de acuíferos, la generación de surgentes que escurren o se empantan, y el embalsamiento y encauzamiento antrópico del agua. Para concluir, se sintetizan avances y retrocesos de una reforma que no alcanzó para eliminar principios obsoletos ni mejorar todas las incoherencias existentes.

PALABRAS CLAVE: Dominio Hidráulico, Derecho de Aguas, Aguas Atmosféricas, Aguas Corrientes, Lagos, Glaciares

ABSTRACT:

The article makes a critical analysis of the legal framework of water sources and reserves in the Andes. Based on the reform of the Civil and Commercial Code (2015), it specifies the ownership of the water resource in the different stages of its cycle, including atmospheric humidity, snow and rain precipitation, snow and glacial accumulation, snowmelt, surface runoff, water accumulation in lakes and ponds, soil moisture, percolation and aquifers, springs that run off or become bogged down, and the reservoirs and water derivations. To conclude, it synthesizes the advances and setbacks of a reform, that was not enough to set aside obsolete principles or overcome all pre-existing inconsistencies.

KEYWORDS: Public Waters, Water Law, Atmospheric Waters, Running Waters, Lakes, Glaciers

INTRODUCCIÓN

El agua en la Cordillera de los Andes se presenta mediante una heterogeneidad de situaciones físicas que abarcan distintos momentos de su circulación por la hidrósfera. La humedad atmosférica, las precipitaciones nívicas y pluviales, la acumulación nívica y glacial, el deshielo, el escurrimiento superficial, la acumulación hídrica en lagos y lagunas, la humedad del suelo, la percolación y formación de acuíferos, la generación de surgentes que escurren o se empañan, el embalsamiento y encauzamiento antrópico del agua, constituyen todos fenómenos existentes en la zona andina; y cada uno presenta un régimen jurídico que le brinda un alcance particular frente a las actividades humanas.

Es generalmente aceptado que desde sus orígenes el régimen civil argentino que inició con el Código Civil (CC) –sancionado en 1869 por Ley 340– impactó en la vida económica y social argentina con notorios efectos en materias que excedían la propiamente civil. Pigretti (1975) explica en este sentido que debido a la ausencia de avances en el régimen de los recursos naturales, el Código Civil se convirtió en uno de los más importantes reguladores del aprovechamiento de la naturaleza, a pesar de que no resultaba específico en esa materia.

Sus regulaciones sobre aguas fueron la base del análisis de juristas que estaban formados bajo un marcado pensamiento civilista, que influyeron, además, en el contenido de diversas normas locales. Por ello, aun cuando se ha observado la

inconsistencia de las normas civiles en materia hídrica (Pinto y Martín, 2015), es indudable que presenta una importancia fáctica frente a un régimen constitucional que ha sido omiso en el tema (Cano, 1988), pero también como norma federal aplicable por analogía al ámbito provincial (Salomoni, 2000) y por ser objeto del reenvío que realizan diversas leyes de aguas provinciales (Pinto y Martín, 2018).

En 2015, la Ley 26994 aprobó el actual Código Comercial y Civil (CCyC) de la República Argentina. La calidad de bienes públicos o privados, y las consiguientes variables que se generan en torno a los recursos hídricos dependen en gran medida de dicho estatuto legal y su interacción con otras normas conexas, resultando de utilidad analizar la situación jurídica que frente al cambio normativo presentan las fuentes y reservas hídricas que caracterizan a la región andina.

MATERIALES Y METODOS

A partir de un diseño metodológico observacional de naturaleza no experimental implementado mediante el uso de estrategias cualitativas, se ha concretado el estudio y correlación de las regulaciones jurídicas sobre dominio de fuentes y reservas hídricas existentes en Argentina, con particular atención a los fenómenos hidrológicos propios de la Cordillera de los Andes.

El enfoque realizado se basa en un análisis dogmático y exegético de las regulaciones contenidas en el Código Civil y Comercial vigente, así como de las propias del anterior Código Civil que rigió con anterioridad. Dicha labor ha procurado establecer correlaciones que determinen similitudes y diferencias entre el régimen actual y sus antecedentes legales, dándose lugar a partir de los resultados a una discusión crítica sobre la significancia y alcance del actual régimen.

DISCUSION Y RESULTADOS

Los fenómenos hidrológicos andinos y su regulación dominial

El tradicional régimen civil argentino sobre aguas se centra en la materia dominial, estableciendo que determinados recursos pertenecen al dominio público, y otros al dominio privado (Pinto y Martín, 2016).

Esta distinción adquiere importancia en cuanto la regulación del dominio público implica un destacado régimen de protección ambiental (Darnaculleta i Gardella, 2000) que se encuentra fortificado con diversas instituciones ajenas a la demanio propiamente dicha. En gran parte, porque toda actividad que implique el uso o afectación de aguas públicas requiere la previa autorización y contralor estatal, lo que facilita la imposición de condiciones y la desaprobación de actividades inconvenientes (Pinto y Andino, 2019)

El dominio público fue establecido inicialmente en el art. 2340 CC, donde se dispuso los bienes que revestían tal naturaleza, pudiendo ser tal dominio marítimo, fluvial, lacustre y artificial. Este régimen del dominio público hidráulico ha continuado en el actual art. 235 del CCyC.

También el Código de 1869 reguló ciertas aguas en propiedad del dueño del predio en el que se encontraban, lo que implica que las mismas presentan el carácter de *pars fundi*. Básicamente, resultaban privadas las aguas de vertiente que nacían y morían en el mismo predio (art. 2350 CC), las de lluvia que caían en fundos privados (art. 2635 CC) y las fuentes (surgentes) que no formaban cauce natural (art. 2637 CC). El actual Código, ha contemplado las aguas privadas en los arts. 236 -lagos no navegables-, 239 -aguas de fuentes- y 1947 -aguas pluviales apropiadas mientras corre por lugares públicos-.

Esta regulación mixta, de aguas públicas y privadas, contradice la lógica sistémica que impone el ciclo hidrológico y la unidad de cuenca, lógica que en materia jurídica debiera manifestarse en lo que Vergara Blanco (1997) denomina el principio de unidad de la corriente, pudiendo sostenerse que el reciente cambio legislativo ha sido una oportunidad perdida para avanzar hacia tales conceptos (Pinto y Martin, 2016).

En los puntos siguientes se analizará el régimen dominial propio de los fenómenos hidrológicos correspondientes a la región andina, en particular las aguas en la etapa atmosférica del ciclo hidrológico, en su precipitación, posterior deshielo y escurrimiento, su enlagueamiento, su percolación y consiguiente surgencia o extracción artificial, y su embalsamiento y conducción en canales artificiales.

Las aguas atmosféricas

La humedad atmosférica es una fuente alternativa de agua en las zonas áridas y semiáridas que puede complementar a otras fuentes tradicionales (Bautista-Olivas et al, 2011), existiendo experiencias de uso de este recurso en diversos países, incluyendo Chile, Perú, Ecuador, República Dominicana, Sudáfrica, Nepal, Canarias, Cabo Verde, Namibia, México (Cereceda, 2000).

Hasta el dictado del actual Código Civil y Comercial, ninguna norma refería en forma explícita al dominio de las aguas atmosféricas, que conforman aquellas que se encuentran en el momento anterior a la precipitación pluvial. Estas aguas solo eran objeto de la regulación administrativa de actividades que alteraban el clima (arts. 90/92 Ley 12257 de Buenos Aires), aunque en algunos casos se avanzaba hacia los usos del agua (art. 158 del Código de Aguas de Córdoba); también existían regulaciones sobre siembra de nubes con fines de prevención de contingencias climáticas (Ley 6638 de Mendoza).

Dentro de la doctrina, Marienhoff (1976) analizó oportunamente el dominio de las nubes de manera específica, señalando que tales aguas atmosféricas resultaban cosas sin dueño (*res nullius*). Otros autores reconocieron en este tema la anomia del Código de 1869, y trataron de justificar el carácter público de tales aguas recurriendo a la analogía del mar territorial y el espacio aéreo (Diez, 1969; Fiorini, 1976); e incluso interpretando el dominio público del espacio aéreo por efecto de la normativa sobre aeronavegación (Pritz, 1998). También se ha sostenido que las aguas atmosféricas fueron transferidas al dominio público en virtud de la Ley 17711, que considera pública toda agua con aptitud de satisfacer usos de interés general- (Moisset de Espanés y López, 1979). Pero en todos los casos, esas opiniones autorales no encontraban un reflejo explícito en normas o pronunciamientos judiciales.

El inc. e) del art. 235 del actual Código Civil incluye al espacio aéreo dentro de los bienes del dominio público, lo que evidentemente alcanza a las aguas que resultan parte de dicho espacio. En consecuencia, sin necesidad de recurrir a forzamientos interpretativos, hoy en día no existen dudas de la publicidad de las aguas atmosféricas.

Las precipitaciones pluviales o níveas

Cuando las aguas atmosféricas precipitan, sea en forma nívea o pluvial, el régimen civil confiere distinta naturaleza dominial según el lugar donde caen.

El Código Civil de 1869 las consideraba privadas cuando cayesen o entrasen en terrenos privados (art. 2635); estableciendo que cuando caían o corrían por lugares públicos todos podían reunir las, incluso desviando su curso natural (art. 2636).

Bajo este régimen los autores habían expuesto diversas interpretaciones. Spota (1941) consideraba como cosa sin dueño (*res nullius*) a las aguas que cayesen o entrasen en dominio privado, sosteniendo que se necesitaba de un acto positivo del propietario (como obras u artes de apropiación) para que el mismo adquiriera el dominio; por el contrario si permitía que las aguas escurriesen hacia un inmueble vecino, las mismas no eran objeto de apropiación. Marienhoff (1939) en cambio, postulaba que las aguas pertenecían por accesión al titular del predio, no siendo necesario ninguna acción para hacer nacer su dominio.

Es decir, siguiendo la tesis de Marienhoff, las lluvias o nevadas que caían sobre un predio privado pertenecían a su dueño por el solo fenómeno natural de la precipitación; mientras que en la opinión de Spota dicha propiedad se generaba solo si el dueño realizaba un acto positivo de apropiación -como sería por ejemplo, su represamiento, o incluso la generación de infraestructura que permite aprovechar deportivamente la nieve acumulada-.

En relación a las precipitaciones en lugares de dominio público, de acuerdo a Spota (1941) las mismas también eran *res nullius* apropiables; Marienhoff (1939) argumentaba que las mismas eran públicas por accesión, y en consecuencia la norma solo autorizaba su uso, correspondiendo a las provincias regular el mismo en forma independiente del dominio fijado por los preceptos civiles.

El texto legal actualmente vigente ha adoptado los conceptos de Spota, estableciendo que las aguas que cayesen en lugares público son apropiables por los particulares como cosas muebles no registrables sin dueño (art. 1947 CCyC). Esta disposición es cuestionable en cuanto resulta enmarañado asignar a las aguas una entidad totalmente independiente del suelo en el que se encuentran, especialmente considerando que el mismo Código ha tomado como concepto de ríos

y lagos que los mismos integran tanto el agua como el lecho que la contiene, y con ello es una antinomia sostener que las aguas que se encuentren o escurran en lugares públicos no adquieren tal condición (Pinto y Martín, 2016).

En cambio, el actual Código no regula las aguas pluviales caídas en dominio privado, y las deja en un estado anómico que solo se supera atendiendo el régimen general de adquisición dominial. En este sentido, en la medida en que no forman cauce natural, las precipitaciones que se encuentran inmovilizadas por su adhesión física al suelo adquieren por accesión la misma naturaleza que este (art. 226 CCyC); y en consecuencia, corresponden al dueño del suelo las precipitaciones níveas mientras no deshielen y escurran, o las aguas precipitadas no se infiltren.

Los escurrimientos fluviales y glaciales

Una parte de las precipitaciones que se producen en los Andes devienen en la generación de escurrimientos, es decir, forman corrientes fluviales perennes, intermitentes o efímeras que se deslizan naturalmente por el terreno y forman los cauces de los ríos (Maderrey Rascón, 2005).

En términos generales, los cursos de agua han sido regulados por la normativa civil como bienes del dominio público, abarcando tanto al agua como al cauce natural que los contienen, y por ello, en la medida en que las agua se encaucen, son públicas. En el Código de 1869, los arts. 2340 inc. 4 y 2577 definían la extensión del cauce a partir del llamado *plenisimum flumen*, es decir, en base a las más altas aguas en su estado normal.

Este régimen fue parcialmente alterado por la Ley 17711, que solo modificó el art. 2340 y se refiere a “las crecidas medias ordinarias” como el límite de las riberas internas de los ríos, generándose así conflictos interpretativos sobre la extensión del dominio sobre los cauces; aunque un análisis integral de la norma permite concluir que la aparente antinomia entre el nuevo texto y el subsistente texto del art. 2577 no fue tal, manteniéndose siempre vigente el *plenisimum flumen* como límite físico de los cauces (López, 1974).

Superando esos textos legales discrepantes, el nuevo Código Civil y Comercial ha eliminado la referida discordancia terminológica. Actualmente los arts. 235 y 1960 adoptan claramente el criterio del *plenisimum flumen* al disponer la línea de ribera en

base al promedio de las máximas crecidas ordinarias. La única variación, en todo caso, es que se ha inducido la técnica de determinación de esas crecidas, indicando que debe basarse en un promedio de las mismas.

El art. 235 CCyC enumera como bienes del dominio público a los ríos, estuarios, arroyos y demás aguas que corren por cauces naturales, los lagos y lagunas navegables, los glaciares y el ambiente periglacial y toda otra agua que tenga o adquiera la aptitud de satisfacer usos de interés general, comprendiéndose en estas últimas a las aguas subterráneas.

Dejando de lado las consideraciones que hacen a lagos, lagunas y aguas subterráneas –que se analizaran infra- se resalta que la nueva normatividad no ha alterado aspectos sustanciales del dominio público fluvial. El detalle de fenómenos hidrológicos que realiza –ríos, estuarios, arroyos y demás aguas que corren por cauces naturales, glaciares y ambiente periglacial- es meramente enunciativo, especificando como ejemplo algunos casos de los diversos cursos de agua que en general siempre fueron considerados dentro del dominio público –como los glaciares-.

Sobre ese último fenómeno –glaciares- Marienhoff (1939) resaltó que “los ventisqueros o glaciares no son otra cosa que cursos de agua, en los que esta aparece congelada en forma característica. El ventisquero tiene los mismos elementos constitutivos de cualquier otro curso de agua: lecho y agua (está congelada); por otra parte, el ventisquero, al igual que los ríos, arroyos, etc., tiene su “curso” o corriente, aunque caracterizado por su lentitud”.

Aunque el nuevo texto legal innova en un aspecto de suma trascendencia, al incorporar el “ambiente periglacial” dentro del dominio público, con seguridad por incidencia de la Ley 26639, de presupuestos mínimos de protección ambiental de glaciares y ambientes periglacial. Debe referirse que si bien dicha ley introduce un régimen tutelar que incorpora los ambientes periglaciares, solamente a los glaciares como bienes públicos, pero no así al ambiente periglacial (Martín y Pinto, 2014).

De este modo, la reciente regulación ha ampliado notoriamente el ámbito territorial del dominio público hidráulico, ya que en los términos de la legislación ambiental el ambiente periglacial implica “en la alta montaña, al área con suelos congelados que

actúa como regulador del recurso hídrico. En la media y baja montaña al área que funciona como regulador de recursos hídricos con suelos saturados en hielo”.

El resultado de este cambio normativo es que extensas regiones cordilleranas que indudablemente eran de propiedad privada, y en las que la humedad del suelo se congela en los términos de la Ley 26639, están siendo consideradas como de dominio público, generando una tensión entre las propiedades preexistentes amparadas por el art. 17 CN y la novedosa pretensión normativa.

Otro caso de aguas fluviales que deben ser precisadas son las fuentes y vertientes. El Código de Vélez contempló como aguas privadas a las aguas de fuente que no forman cauce natural (art. 2637 CC) y a las de vertiente que nacen y mueren en el mismo predio (art. 2350 CC).

Si bien en la doctrina diversos autores han entremezclado los conceptos de fuentes y vertientes como regulatorios del mismo fenómeno (Marienhoff, 1939; Allende, 1971), otros autores como Cano (1944), Bridge (1970) o López (1973) los han diferenciado claramente, tanto en base a un análisis normativo como también a partir de los antecedentes seguidos por el Codificador.

En este tema, Spota (1941) diferencia entre fuentes y vertientes en base a un amplio y substancial examen gramatical y normativo, que incluye las fuentes citadas por el redactor del Código de 1896 en relación a los arts. 2637 y 2350 CC, afirmando que dichos preceptos no referían a los mismos fenómenos hidrológicos: el art. 2350 CC regulaba aguas originadas en precipitaciones nievales o pluviales que vertían – descendían- desde puntos más elevados del terreno; mientras que el art. 2637 CC trataba las aguas que brotaban o surgían en terrenos particulares –es decir, que alumbran al exterior de manera natural luego de haber tenido un trayecto subterráneo-.

Ambas posturas han sido acogidas por la jurisprudencia. La tesis que distingue ambos fenómenos fue sostenida por la Suprema Corte de Justicia Mendoza (1952). La posición que confunde ambos conceptos fue seguida por la Corte de Jujuy; sin embargo, al intervenir luego en el caso la Corte Nacional, aunque el voto de la mayoría de este Tribunal rechazó formalmente considerar el conflicto, el juez Fayt

en forma disidente sostuvo que no puede confundirse a las fuentes y las vertientes ya que son dos conceptos legales diferenciables (CSJN, 1986).

De este modo, mientras que la tesis monista identifica todos los casos en uno; en la tesis dualista el fenómeno regulado como fuente se refiere a aguas que surgen del suelo -en vegas y manantiales andinos-, mientras que el fenómeno de las vertientes implica aguas que escurren en las pendientes andinas provenientes de lluvias o deshielos.

El Código sancionado en 2015 ha innovado en el tema, ya que ha prescindido de toda regulación sobre las vertientes: en el régimen civil actual no hay ninguna norma que exima del principio de dominio público a las vertientes que nacen y mueren en el mismo fundo de aquellas aguas que corren en cauces naturales.

Este cambio normativo, sin embargo, no impide que aquellos que ostentaban un derecho de propiedad anterior al cambio legislativo puedan invocar que en función del art. 17 CN no puede producirse la publicación del mismo sin que se satisfaga la exigencia de la previa indemnización. Debate que coincide con el ya producido en torno a las aguas subterráneas y la Ley 17711, según se detalla infra.

Por el contrario, los cambios que se produzcan con posterioridad a la vigencia de la nueva norma, por ejemplo mediante la unificación de heredades vecinas de modo que la vertiente comienza a nacer y morir dentro de una misma propiedad, quedan englobados en el régimen vigente al momento de su producción, y por ello no alteran la publicidad que rige como principio (Pinto y Martín, 2016).

En relación a las aguas provenientes de fuente, el artículo 239 CCyC establece:

Las aguas que surgen en los terrenos de los particulares pertenecen a sus dueños, quienes pueden usar libremente de ellas, siempre que no formen cauce natural. Las aguas de los particulares quedan sujetas al control y a las restricciones que en interés público establezca la autoridad de aplicación. Nadie puede usar de aguas privadas en perjuicio de terceros ni en mayor medida de su derecho.

Pertenecen al dominio público si constituyen cursos de agua por cauces naturales. Los particulares no deben alterar esos cursos de agua. El uso por cualquier título de aguas públicas, u obras construidas para

utilidad o comodidad común, no les hace perder el carácter de bienes públicos del Estado, inalienables e imprescriptibles. El hecho de correr los cursos de agua por los terrenos inferiores no da a los dueños de éstos derecho alguno.

Si bien este texto resulta similar al régimen anterior, en su redacción pueden observarse significativas particularizaciones que profundizan el régimen público; en esta línea, se ha excluido la potestad de los propietarios de cambiar el curso o dirección natural del recurso, exponiéndose claramente que la fuente es privada solo si no forma cauce natural.

Los lagos y lagunas

El Código de 1869 establecía a los lagos navegables por buques de más de 100 toneladas y sus márgenes como bienes de dominio público -art. 2340-. A partir de la Ley 17711 se eliminó la magnitud de los buques, permitiendo que el lago fuera navegable sin interesar el tonelaje de la embarcación.

Al respecto, la jurisprudencia ha dispuesto que la navegación como concepto se aplica tanto a los cursos propiamente navegables, como también a aquellos de menor profundidad que resultan flotables por ser utilizados mediante balsas, almadías, lanchones y jangadas de calado escaso. Sin embargo, aunque también ha subordinado dicha noción a las características del tráfico que se presente, ya que para ser navegable tiene que servir como medio de transporte público continuo basado en un interés general, conformando así un tráfico fluvial organizado desde la perspectiva económica (CSJN, 2009); criterio que limita severamente los casos en los que los lagos resultan navegables y por consiguiente, públicos.

Con respecto a los lagos no navegables, aunque un vetusto antecedente judicial sostenía la naturaleza privada de los mismos en beneficio del titular del predio ribereño (CSJN, 1923), la inexistencia de un régimen legal específico daba lugar a diversas posturas sobre el dominio público de los mismos, destacándose los argumentos de Spota (1941) y Bibiloni (1930) que en base al concepto de unidad del fenómeno hidrológico sostenían que cuando los lagos resultaban del ensanchamiento de un río que los alimentaba o desaguaba presentaban la misma naturaleza que dicho curso.

El texto del nuevo Código Civil y Comercial ha mantenido sin cambios el régimen de los lagos navegables (art. 235 inc. c), pero en el art. 236 ha innovado en relación a los lagos no navegables, incluyéndolos dentro de los bienes privados del Estado en aquellos supuestos en que carezcan de dueños.

Este régimen presenta numerosas inconsistencias. Por una parte, no puede sostenerse lógicamente que un lago no navegable carezca de dueño, siendo que según el anterior régimen era discutible si resultaban del dominio privado o del dominio público, pero de ningún modo podían ser tenidos como *res nullius*. El efecto de esta situación es que el nuevo texto es un abstracto sin aplicación (Pinto y Martín, 2015) en la medida en que al no existir lagos sin dueños que por imperio de la nueva norma puedan ser incluidos en el dominio privado estatal, el nuevo precepto carece de todo sentido con excepción de aquellos lagos que ya fueran desde el régimen anterior bienes privados del Estado.

Sobre esto último, incluso en la hipótesis de que en el régimen anterior los lagos no navegables fueran privados, el carácter de *pars fundi* que la doctrina y jurisprudencia (CSJN, 1923) les otorgaba para sostener tal tesis impide ahora que los mismos tengan un régimen autónomo al que corresponde a los inmuebles que carecen de dueño, lo que hace redundante el régimen de los lagos y los inmuebles que contiene el mismo art. 236.

Además de ello, este caso muestra la involución del nuevo Código con respecto a la tendencia actual que postula la publicidad genérica de las aguas, colocando a estos cuerpos de agua en una situación jurídica endeble, en la medida en que los bienes privados del Estado pueden ser enajenados por venta, donación e incluso prescripción adquisitiva en favor de particulares, siendo esto último muy factible en lagos andinos que se encuentran aislados en el interior de grandes estancias (Pinto y Martín, 2016).

Posiblemente, la solución a este retroceso y debilidad en la titularidad estatal resulte la afectación de los lagos no navegables de propiedad estatal al dominio público mediante el dictado de leyes provinciales, como es la experiencia analizada infra en materia de aguas subterráneas. Mendoza ha avanzado en este sentido mediante la Ley 9190.

Las aguas subterráneas

El original Código de 1869 omitía toda referencia a las aguas subterráneas, lo que había llevado a la jurisprudencia a sostener que las mismas revestían el carácter de *pars fundi*, es decir, que estaban alcanzadas por la propiedad privada del dueño del predio superficial (CSJN, 1924).

En 1968, la Ley 17711 modificó el art. 2340 del Código Civil, e incluyó en los bienes públicos a “toda otra agua que tenga o adquiera la aptitud de satisfacer usos de interés general, comprendiéndose las aguas subterráneas”. Dicha modificación generó diversos debates en relación al efecto del cambio normativo en relación a aquellas aguas que eran privadas bajo las leyes anteriores, como en particular ocurría con las aguas subterráneas.

Algunos autores sostuvieron que el carácter público de las aguas subterráneas había sido impuesto por la mera vigencia de la nueva norma, con lo que su dictado materializaba la publicación de tales recursos (Bridge y Pina, 1977). Sin embargo, importantes juristas sostuvieron que tal interpretación daba lugar a la inconstitucionalidad del régimen, ya que se había omitido la expropiación previa y la indemnización que impone el art. 17 CN para traspasar bienes privados al dominio público (Marienhoff, 1970).

Un tercer sector autoral, procurando una visión superadora del conflicto constitucional, sostuvo que la nueva norma debía ser considerada una declaración genérica de utilidad pública, lo que requería que la misma fuera especificada mediante normas provinciales que determinaran en concreto el bien afectado al dominio público y satisficieran el requisito indemnizatorio del art. 17 CN (Moisset de Espanés y López, 1979). En esta tesis, la norma civil carecía de eficacia si no era complementada por las normas locales.

Siguiendo esta doctrina, las Provincias donde existían importantes usos de aguas subterráneas buscaron brindar seguridad jurídica y eficacia a la publicidad de las aguas subterráneas mediante su afectación expresa al dominio público, contemplando el correspondiente mecanismo indemnizatorio para aquellos que los requirieran (Ley 4035 de Mendoza).

El actual Código, no ha innovado en este tópico.

Los embalses y cauces artificiales

En forma coincidente, el art. 2340 inc. 7 CC y el art. 235 inc. f) CCyC incluyen dentro del dominio público a los canales, puentes y cualquier otra obra construida para utilidad o comodidad común. De este modo, el actual régimen no altera de ningún modo el carácter público de las obras hidráulicas como diques, azudes, canales, u otras que beneficien a una colectividad de usuarios.

Limitaciones dominiales vinculadas a las aguas

En forma tradicional el régimen civil ha contemplado las limitaciones impuestas a la propiedad privada con fundamento en el interés privado; las limitaciones que se imponen por interés público corresponden a preceptos del derecho administrativo.

Dichas limitaciones pueden implicar tanto restricciones al normal ejercicio de la propiedad para que se ejerza en forma compatible con el adecuado uso del agua, o servidumbres que desmembrando la exclusividad de la propiedad permitan a terceros acceder materialmente al uso del agua (Pinto, 2004).

Al regular restricciones basadas en relaciones vecinales el nuevo Código Civil y Comercial se ha dispuesto que la aplicación subsidiaria en relación a las restricciones establecidas por el derecho administrativo (art. 1970). Esta subordinación de la norma civil a la administrativa es adecuada en la medida en que las relaciones comunitarias resultan más acordes a la esfera social –y por consiguiente, al interés público- que a las esferas personal e individual que se relaciona a la ley civil; junto a ello, se resalta que gran parte de las regulaciones civiles suelen coincidir con las fijadas en las leyes administrativas, siendo eficaz el sistema de subsidiariedad estipulado en beneficio de las normas de interés público.

Como restricciones previstas en la nueva ley civil, el art. 1975 CCyC establece que los dueños de inmuebles ribereños no pueden realizar obras que alteren el curso natural de las aguas o modifiquen su dirección o velocidad, a menos que sea meramente defensiva. Si algún ribereño resulta perjudicado por trabajos de otros ribereños o de un tercero, con el fin de restablecer las aguas a su estado anterior puede remover el obstáculo, construir o reparar obras defensivas, y reclamar al causante tanto el valor de los gastos como la indemnización de los daños. Si el obstáculo se origina en un

caso fortuito, la norma estipula que el Estado debe restablecer las aguas a su estado anterior o pagar el valor de los gastos necesarios para hacerlo.

Esta regulación coincide en parte con aspectos que antes contemplaba el Código de 1869 en los arts. 2642 a 2646; sin embargo, el nuevo texto legal se limita solo a las obras defensivas.

Desde una perspectiva crítica, puede observarse que la actual norma cae en un exceso competencial, debido a que las leyes civiles no pueden autorizar modificaciones al dominio público sin entrometerse con contenidos que son exclusivos del derecho público que deben legislar las provincias.

Por otra parte, el precepto comentado asigna responsabilidad al Estado por obstáculos generados por motivos fortuitos, aspecto que debe limitarse en función del art. 2 inc. a) de la Ley 26944, de Responsabilidad del Estado, según el cual la responsabilidad estatal que se deriven de casos fortuitos o fuerza mayor queda eximida salvo que sea asumida expresamente por ley especial. Sin embargo, en el esquema de esa norma la responsabilidad estatal es propia del derecho público, por lo que las Provincias no pueden ser objeto de responsabilidades dispuestas en el régimen civil sancionado por el Congreso.

También resalta el art. 1976 CCyC que contempla la recepción de agua, arena y piedras cuando se desplazan desde otro fundo si no han sido degradadas ni hubo interferencia del hombre en su desplazamiento, pudiendo derivarse también el agua extraída artificialmente, la arena o las piedras que arrastra el agua cuando no causan perjuicio a los inmuebles que las reciben. Este precepto contiene un cambio sustancial con el antiguo régimen (arts. 2632, 2633, 2648 y 2650 CC), que prohibía hacer correr aguas generadas artificialmente sobre el predio vecino, e imponía como obligación que los desagües sean a la vía pública o indemnizar los perjuicios cuando ello no sea viable; y además desarrolla ciertos principios que estaban presentes en diversos preceptos del Código decimonónico (los arts. 2634, 2638, 2647, 2649, 2651, 2652 y 2653), aunque con una simplificación extrema que neutraliza la previsión casuística de importantes supuestos más específicos.

El art. 1974 CCyC regula el camino de sirga, antigua restricción contenida en los arts. 2639/2640 del Código de 1869. De acuerdo a esta norma en los inmuebles

colindantes con las orillas o riberas de cauces aptos para el transporte por agua debe dejarse libre una franja en toda la extensión del curso, en la que no puede hacerse ningún acto que menoscabe aquella actividad. El nuevo texto legal ha reducido la franja afectada por dicho camino, desde un máximo de treinta y cinco metros en algunos supuestos, a quince metros para todos los casos.

Finalmente, en relación a las servidumbres que pueden limitar el dominio, el nuevo Código ha simplificado notoriamente el régimen, lo que demandará en el futuro una técnica contractual más detallada. Lejos del Código de 1869, que era sumamente reglamentarista al regular las servidumbres de acueducto (arts. 3082/3092), de recibir aguas (arts. 3093/4103) y de sacar aguas (arts. 3104/3107); el nuevo Código solo enumera como servidumbres forzosas a las de acueducto y de recibir agua (art. 2166), contemplando que la indemnización por su imposición debe ser fijada judicialmente si el dueño del fundo afectado no conviene al respecto con el beneficiario de la servidumbre.

Acceso al uso de las aguas

El Código de 1869 contenía diversas reglas sobre uso de las aguas públicas. Entre ellas, por ejemplo, el art. 2349 CC contemplaba el uso de los lagos por sus ribereños, o el art. 2642 CC prohibía extraer agua de los cauces si no se tenía una concesión.

Estas regulaciones eran indebidas en la medida que, como explica Marienhoff (1939), es un exceso inconstitucional de la materia civil regular el uso del agua pública. Se corrigió esta situación en un avance claramente positivo, el actual Código presenta una depuración de tales contenidos, limitándose en el art. 237 CCyC a referir en forma genérica que el uso y goce de los bienes públicos debe darse bajo las disposiciones generales y locales, sin disponer ninguna norma en relación al uso del agua.

De este modo, todo aspecto referido al uso y preservación de las aguas públicas es un acervo de la legislación de aguas locales, lo que se ha manifestado en las diversas Leyes y Códigos de Aguas dictados en las provincias cordilleranas, los que presentan diversas variables muchas veces coincidentes en torno al acceso y uso del agua pública (Martin y Pinto, 2020).

CONCLUSIONES

Las variadas formas físicas que presentan las fuentes y reservas de aguas en los Andes argentinos se corresponden con distintas naturalezas y formas jurídicas. Este paradigma de regulación a partir de los tipos o clases de aguas ha configurado, sin embargo, un régimen complejo e incoherente que comienza por desconocer la unidad elemental del ciclo hidrológico con el mantenimiento simultáneo de aguas de naturaleza jurídica pública y privada, y culmina con la regulación fragmentada según el tipo o clase de agua que se trate.

Esa incertidumbre jurídica e incoherencia relativa respecto del régimen aplicable a las aguas de los Andes ha evolucionado con la sanción del Código Civil y Comercial de 2015 pero no ha desaparecido, pudiéndose reseñar que:

- 1- La nueva norma presenta avances claros en la definición del dominio público de las aguas atmosféricas, aunque ha dado lugar a un régimen incompleto y contradictorio en relación al dominio de la precipitación.
- 2- En materia de escurrimientos, la nueva norma supera la controversia previa existente sobre la extensión de los cauces; y ha tenido una clara tendencia publicista al erradicar de sus regulaciones a las vertientes privadas y acentuar el carácter público de las fuentes; también al incorporar el ambiente periglacial al dominio público, aunque produciendo una tensión y potencial conflicto con el derecho de propiedad preexistente sobre esas áreas.
- 3- Con respecto a lagos, por el contrario, se observa un retroceso en su ámbito de publicidad, tanto por el criterio jurisprudencial restrictivo sobre el alcance de la navegabilidad que amplía los supuestos de lagos no navegables, como por la regulación privatista de los lagos no navegables. En ese contexto crece la importancia de las posibles estrategias en la publicación mediante leyes provinciales.
- 4- No ha habido alteración, en cambio, con relación al carácter público de las aguas subterráneas y las obras hídricas.

- 5- El nuevo Código reconoce la preminencia del régimen administrativo en materia de limitaciones dominiales y usos del agua, lo que resulta más coherente en mérito al interés público que caracteriza los usos del agua.

BIBLIOGRAFIA

- Allende, G. (1971). *Derecho de Aguas con acotaciones hidrológicas*, Buenos Aires: Eudeba
- Bautista-Olivas, A. L., Tovar-Salinas, J. L., Palacios-Velez, O. L., y Mancilla-Villa, O. R. (2011). La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. *Agrociencia*, 45(3), 293-301.
- Bibiloni, J. A. (1930). *Anteproyecto de reformas al Código Civil Argentino*, 3, Buenos Aires: V. Abeledo
- Bridge, A. (1970). *Estudios de Derechos de Aguas*, I, San Juan: CFI
- Bridge, A. y Pina, O. (1977). Dominio de las aguas, cauces y obras hidráulicas, efectos del cambio de legislación y reasignación de usos. En *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua*, Mar del Plata, doc. Confagua/C14/7
- Cano, G. (1944). Repercusión económica de la jurisprudencia en materia de aguas de fuente o manantiales. *Jurisprudencia Argentina*, II, 275-285.
- Cano, G. (1988). *Estudios sobre Línea de Ribera*, I, Buenos Aires: CFI
- Cereceda, P.(2000). Los atrapanieblas, tecnología alternativa para el desarrollo rural. *Revista Medio Ambiente y Desarrollo*, XVI (4), 51-56
- Corte Suprema de Justicia de la Nación (1923), in re Frederking, Gustavo c. Provincia de Buenos Aires, Fallos 138: 295.
- Corte Suprema de Justicia de la Nación (1924), in re Provincia de Mendoza v. Cía. de Ferrocarriles Gran Oeste Argentino y Bs. As. al Pacífico Fallos 140:282
- Corte Suprema de Justicia de la Nación (2009), in re Las Mañanitas S.A. c/Neuquén, Provincia de s/acción declarativa de certeza, Fallos 332:1704
- Corte Suprema de Justicia de la Nación (1986), in re Agrícola e Industrial c/Estado Provincial, Fallos 308:641
- Darnaculleta I Gardella, M. (2000). *Recursos naturales y dominio público: el nuevo régimen de demanio natural*, Barcelona: Cedeca.

- Diez, M. (1969). *Derecho Administrativo*, IV, Buenos Aires: Plus Ultra.
- Fiorini, B. (1976). *Derecho Administrativo*, II, Abeledo Perrot: Buenos Aires
- López, J. (1973). *Código de Aguas de la Provincia de Córdoba*, Córdoba: Dirección Provincial de Hidráulica.
- López, J. (1974). Cursos de Agua. *Curso de Derecho de Aguas*, vol I, Mendoza: INCyTH, 135-166.
- Maderey Rascón, Laura E. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*, México: UNAM
- Marienhoff, M. (1939). *Régimen y legislación de las aguas públicas y privadas*, Buenos Aires: V. Abeledo.
- Marienhoff, M. (1970). La reciente reforma del Código Civil en materia de aguas. *Jurisprudencia Argentina*, Sec. Doct., 255-268.
- Marienhoff, M. (1976). Condición jurídica de las nubes. Nuevas sugerencias. *Jurisprudencia Argentina*, III, 683-690.
- Martin, L. y Pinto, M. (2014). La protección del ambiente glacial. *Revista de Derecho Administrativo Económico*, 18, Santiago de Chile, 99-117.
- Martin, L. y Pinto, M. (2020). Water permits and concessions for irrigation in Argentina. Status quaestionis and trends in comparative perspective. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, UNCuyo, Tomo 52-2, 204-214.
- Moisset de Espanes, L. y López J. (1979). Derecho de Aguas. Régimen Transitorio y Normas de Conflicto. *Boletín de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales*, Universidad nacional de Córdoba, 331-2, 335-363.
- Pigretti, E. (1975). *Política legal de los recursos naturales*, Buenos Aires: Cooperadora de Derecho y Ciencias Sociales.
- Pinto, M. (2004). Limitaciones al dominio vinculadas al uso de aguas. *La Ley Gran Cuyo*, 742-751.
- Pinto, M. y Andino, M. (2019). El procedimiento sancionatorio ambiental en Argentina. En M. García Pachón (dir), *Procedimiento sancionatorio ambiental*, Bogotá: Universidad Externado de Colombia, 711-750.
- Pinto, M. y Martin, L. (2015). El régimen de las aguas en el nuevo Código Civil y Comercial y su compatibilidad para la tutela ambiental. *Revista de Derecho Ambiental*, Abeledo Perrot, n° 43, 109-127.

Pinto, M.Y MARTIN, L. (2016). Un paso atrás: mantenimiento y regulación de las aguas privadas en el nuevo Código Civil y Comercial argentino de 2015. *Revista Jurídica de Buenos Aires*, 2016-I, Abeledo Perrot, 67-89.

Pinto, M. y Martin, L. (2018). Análisis crítico del impacto del nuevo Código Civil y Comercial en el Derecho de Aguas. En R.Pizarro y A.Buteler, *El Código Civil y Comercial de la Nación y el impacto en el Derecho Administrativo*, Buenos Aires: La Ley, 407-431.

Pritz, O. (1998). Dominio público: el elemento objetivo. En J.C. Cassagne (dir), *Derecho Administrativo*, Buenos Aires: Abeledo Perrot, 1095-1121.

Salomoni, J. L. (2000). El régimen del dominio público en Argentina: un intento de reconstrucción dogmática. *Actualidad en el Derecho Público*, 14, Ad-Hoc, 81-110.

Spota, A. (1941). *Tratado de Derecho de Aguas*, II, Buenos Aires: Jesús Menéndez.

Suprema Corte de Justicia de Mendoza (1952), in re Ruiz de Correa Edith Y Otros, *Libro de Sentencias*, 051-268.

Vergara Blanco, A. (1997). El principio de la unidad de la corriente en el derecho de aguas. *Revista de Derecho de Aguas*, Universidad de Atacama, Vol. VIII, 41-50.

LOS AUTORES

Mauricio Pinto es Abogado, Diplomado en Estudios Avanzados en Propiedades Públicas y Medio Ambiente, Máster en Derecho Ambiental y Doctor en Derecho por la Universidad de Zaragoza; Profesor de Derecho Ambiental en la Universidades Nacional de Cuyo y Aconcagua; dirige proyectos de investigación, posgrado y es autor de numerosas publicaciones y trabajos sobre ambiente, derecho de aguas y recursos naturales, derecho administrativo y derechos humanos. Se desempeña como Director de Asuntos Ambientales en la Fiscalía de Estado de la Provincia de Mendoza.


Liber Martin es Abogado, Diplomado en Economía y Doctor en Derecho por la Universidad de Zaragoza; Profesor de Derecho Administrativo, Ambiental y de los Recursos Naturales de las Universidades Nacional de Cuyo y Mendoza e Investigador de CONICET. Ha sido Becario Posdoctoral de la FMSH y Profesor Visitante en la Université Paris I Panthéon Sorbonne, UC Boulder y la Universidad de California. Dirige proyectos de investigación, posgrado y es autor de numerosas publicaciones y trabajos sobre ambiente, derecho de aguas y recursos naturales, derecho administrativo y derechos humanos.

Cambios en la cobertura de nieve y su relación con el caudal para la caracterización, monitoreo y gestión de las cuencas de montaña en los Andes extratropicales de Chile entre los 29° y 37°S utilizando teledetección

Changes in snow cover and its relationship with flow for the characterization, monitoring and management of mountain basins in the extratropical Andes of Chile between 29° and 37°S using remote sensing

 <https://doi.org/10.48162/rev.40.010>


Ana Guadalupe Hernández-Duarte  orcid.org/0000-0001-9919-018X

Doctorado Interdisciplinario en Ciencias Ambientales.
Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Playa Ancha,
Laboratorio de Teledetección y Monitoreo Ambiental (TeleAmb). Departamento de Ciencias y Geografía,
Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Playa Ancha.
Departamento de Ciencias y Geografía, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas,
Universidad de Playa Ancha.
 ana.hernandez@upla.cl

Jean Pierre Francois Sepúlveda  orcid.org/0000-0001-7616-0762

Departamento de Ciencias y Geografía, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas,
Universidad de Playa Ancha.
HUB Ambiental, Universidad de Playa Ancha
 jpfrancois@upla.cl


Valentina Ignacia Contreras Figueroa  orcid.org/0000-0001-8498-2053

Departamento de Ciencias y Geografía, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas,
Universidad de Playa Ancha.
 valentina.contreras@alumnos.upla.cl

Flavia Renne Saud Valero

Universidad Andrés Bello
 f.saudvalero@gmail.com

Freddy Alejandro Saavedra Pimentel  orcid.org/0000-0003-0298-7198

Laboratorio de Teledetección y Monitoreo Ambiental (TeleAmb). Departamento de Ciencias y Geografía,
Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Playa Ancha.
Departamento de Ciencias y Geografía, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas,
Universidad de Playa Ancha.
HUB Ambiental, Universidad de Playa Ancha
 freddy.saavedra@upla.cl

RESUMEN

Chile Central (30° - 37°S), concentra cerca del 75% de la población total del país, lo cual se traduce en una enorme demanda hídrica. Gran parte del agua disponible del área en cuestión proviene de la nieve estacional y los glaciares ubicados en la alta cordillera. En este contexto, el cambio climático se emplaza como una amenaza para la seguridad hídrica, mediante la disminución en las precipitaciones y la aceleración del derretimiento de las nieves. Se hace necesario contar con robustos sistemas de monitoreo de la variabilidad espacio temporal de los patrones de nieve de manera de poder cuantificar efectos y zonificar áreas afectadas para desarrollar sistemas de pronósticos y preparar planes de contingencia. El presente trabajo establece la relación entre cobertura nival y el caudal, determinando la variabilidad espacio-temporal entre el año 2000-2020 de subcuencas de los Andes extratropicales de Chile (29°-37°S), mediante imágenes satelitales MODIS y variables climáticas utilizando Google Earth Engine. Los resultados, dan cuenta a la caracterización del régimen hidrológico y el patrón estacional de la nieve de las subcuencas estudiadas, siendo de régimen nival las ubicadas en la porción central del área de estudio (30,5°-35° S), y las mixtas en los bordes (29° y 36° S). Esta configuración, repercute en la dinámica anual de los caudales en donde se aprecia un periodo de desfase entre el máximo de precipitación sólida y el máximo del caudal. Asimismo, se observó una disminución constante en la cobertura de nieves durante los últimos 20 años, siendo apreciable que en la porción central del área de estudio (i.e. 33° - 35°S) este proceso ocurre de forma más severa. La experiencia obtenida en función al análisis y resultados en este trabajo, indica la factibilidad de utilizar aproximaciones asociadas a la teledetección satelital a fin de estimar variaciones en el patrón de cobertura de nieve y caracterizar de mejor manera los regímenes hidrológicos de cuencas con datos meteorológicos limitados con el propósito de apoyar el monitoreo hídrico para la sustentabilidad de la criósfera y para la seguridad hídrica de los territorios.

PALABRAS CLAVE: cobertura nival, hidrología de montaña, Andes extratropicales, teledetección, Google Earth Engine

ABSTRACT

Central Chile (30°- 37° S), concentrates about 75% of the population of the country which translates into a huge demand for water. Much of the available water in this area comes from seasonal snow and glaciers located in the high mountain. In this context, climate change is positioned as a threat to water security through the decrease in rainfall and the acceleration of the melting of snows. It is necessary to have robust systems to monitor the spatial-temporal variability of snow patterns in order to quantify effects and map affected areas and to develop forecasting systems and prepare contingency plans. The present work establishes the relationship between snow cover and flow determining the spatio-temporal variability of sub-basins of the extratropical Andes of Chile (29°- 37° S) between the years 2000-2020 using MODIS satellite images and climate variables through Google Earth Engine. The results account for the characterization of the hydrological regime and the seasonal pattern of the snow of the sub-basins studied, being those located in the central portion of the study area (30.5°- 35° S) of a snow regime, and at the edges (29° and 36° S) mixed regime. This configuration affects the annual flow dynamics where a lag period can be seen between the maximum continuous precipitation and the maximum flow rate. Likewise, there has been a constant decrease in snow cover during the last 20 years being appreciable that in the central portion of the study area (that is, 33°- 35° S) this process occurs more severely. The experience gained from the analysis and the results of this work indicate the feasibility of using approximations associated with satellite remote sensing to estimate variations in the snow cover pattern and better characterize the hydrological regimes of basins with limited meteorological data to support water monitoring for the sustainability of the cryosphere and for the water security of the territories

KEY WORDS: snow cover, mountain hydrology, extratropical Andes, remote sensing, Google Earth Engine.

INTRODUCCIÓN

La nieve estacional y los glaciares son importantes elementos del paisaje que cumplen funciones claves en el suministro de agua dulce para el ser humano y los ecosistemas. En las cuencas dominadas por la nieve, esta proporciona la mayor reserva de agua (Adam, Hamlet, & Lettenmaier, 2009; Masiokas et al., 2006), que influye en la descarga de ríos, afectando la erosión, el transporte de sedimentos y el almacenamiento potencial de agua (Arsenault, Houser, & De Lannoy, 2014; Hall et al., 2012). Para el caso de Chile, la criósfera de los Andes aporta agua a más de dos

tercios de la población, considerando que las cuencas alimentadas por deshielos son mayoritarias entre las regiones de Atacama y Maule. Sin embargo, el cambio climático tiene como efecto más evidente la aceleración del derretimiento de las nieves y retroceso de glaciares (Adam et al., 2009; Barnett, Adam, & Lettenmaier, 2005; IPCC, 2019; Saavedra et al., 2018). El impacto sobre la criósfera de los Andes se documenta en diversos estudios (Cortés & Margulis, 2017; Malmros et al., 2018; Masiokas et al., 2006; Mernild et al., 2017; Saavedra et al., 2018), lo anterior afectará el mantenimiento de actividades económicas clave, ecosistemas y servicios ecosistémicos del área más poblada a nivel nacional.

La variabilidad espacio temporal de los patrones de cobertura de nieves se ha utilizado para generar modelos operacionales para el deshielo, pronósticos de escorrentía, asimilación de datos y calibración/validación de varios modelos hidrológicos (Dong, 2018). Una adecuada determinación de la disponibilidad de agua permitirá cuantificar posibles impactos, determinar vulnerabilidad y riesgo, zonificar áreas afectadas, desarrollar sistemas de pronósticos robustos y preparar planes de gestión de riesgos de desastres, seguridad hídrica, y adaptación al cambio climático.

La predicción de caudales es una herramienta importante para la planificación de los recursos hídricos. La capacidad de producir pronósticos de caudal sólidos y precisos a principios de la temporada mejora la calidad de información para la toma de decisiones para gestionar el recurso escaso (Alizadeh et al., 2018; Khatibi et al., 2012). Diferentes modelos han sido utilizados para la modelación de caudales, destacándose entre estos los de carácter estadístico, que utilizan regresiones basadas en las combinaciones de factores como la capa de nieve actual, la humedad del suelo, caudales previos y las precipitaciones de otoño para la producción de pronósticos de caudales (Pagano & Garen, 2003; Wałęga & Rutkowska, 2015), y los de simulación hidrológica. Estos últimos, intentan representar procesos físicos que afectan la generación de caudales, como lo puede ser la escorrentía (Markstrom et al., 2015). En Chile, el modelo hidrológico más utilizado es la Evaluación y Planificación del Agua (WEAP, por sus siglas en inglés) por la facilidad de implementación y los pocos requerimientos de parámetros (Cortés, 2010; McNamara et al, 2020), aun cuando también se han utilizado otros modelos como SNOW-17, FTXZ, MSND, TopNet para predecir el volumen de escorrentía de deshielo

(Lundquist et al., 2021). No obstante, a pesar de lo prometedor que puedan resultar estos modelos hidrológicos, todos estos comparten una limitación común, que es la disponibilidad y precisión de los datos de entrada. En particular, es de destacarse que entre todas las variables utilizadas por estos modelos, la precipitación sólida en áreas cordilleranas representa por lejos el dato con el mayor sesgo de muestreo e inexactitud (Falvey & Garreaud, 2007; Favier et al., 2009; Ragetti et al., 2014; Rojas, 2006; Shaw et al., 2020). No obstante, esta limitación, en la calidad y distribución de los datos meteorológicos (i.e. precipitaciones, temperatura y descarga) asociados a áreas cordilleranas, puede ser soslayada mediante el uso de la teledetección, pudiendo así acercarnos a examinar y predecir el comportamiento de las cuencas en términos hidrológicos.

Por consiguiente, los datos de teledetección sobre el área cubierta de nieve pueden ser potencialmente útiles para mejorar los pronósticos de caudal en una región con escasez de datos debido a condiciones topográficamente complejas y de alto costo de monitoreo instrumental en tierra (Borsdorf & Stadel, 2015; Saavedra et al., 2018). Estudios anteriores han utilizado el área cubierta de nieve (ACN o SCA por sus siglas en inglés) para forzar modelos hidrológicos de producción de escorrentía (Molotch & Meromy, 2014; Martinec, Rango, & Roberts, 2008; Rango, Salomonson, & Foster, 1977). Dadas las limitaciones en los datos disponibles de precipitación y temperatura para utilizar modelos físicos, el uso de datos de cubierta de nieve para el desarrollo de un modelo estadístico simple es promisorio. Sin embargo, la posibilidad de utilizar información satelital requiere probar la relación ACN con el caudal y verificar la variabilidad en los patrones de nieve producto del cambio climático.

Ante la necesidad de comprender cómo la pérdida de nieve puede afectar el caudal en la región, como la necesidad de métodos simples que contribuyan a generar información para modelos hidrológicos en regiones con escasez de datos e influencia nival. Este artículo plantea como objetivo: establecer la relación entre cobertura nival y caudal, determinando la variabilidad espacio-temporal para las subcuencas de los Andes extratropicales de Chile (29°-37°S), mediante la implementación de imágenes satelitales del sensor MODIS y variables climáticas.

Área de estudio

El área de estudio está ubicada en los Andes extratropicales de Chile entre los 29° y 37°S, en donde subcuencas ubicadas en las cabeceras de los Andes (i.e. áreas altoandinas) fueron utilizadas como objeto de estudio por su nexa criósfera-hidrosfera. En esta área, los Andes alcanzan elevaciones máximas sobre los 6000 m en los 32°S, que disminuyen a 4000 m en el límite sur (**Figura 1b**). De igual manera, la altitud promedio de la línea de nieve regional disminuye gradualmente de norte a sur, encontrándose a los 29°S a los 4000 m mientras que a los 36°S este se ubica a los 1900 m (Saavedra et al., 2017) (**Figura 1b**). El área de estudio tiene un clima de tipo mediterráneo, caracterizado por veranos cálidos y secos e inviernos fríos y húmedos. La temperatura tiene una fuerte variabilidad con la elevación, con medias anuales que oscilan entre los 10° y 20°C en la zona costera y que descienden a menos de -10°C en las elevaciones más altas (**Figura 1d**). La precipitación anual, también exhibe una variabilidad dada por el gradiente latitudinal, registrándose valores de ~500 mm en el norte (31°S) y de ~2000 mm al sur (36°S) en las áreas ubicadas por sobre los 2500 m (Fernández & Gironás, 2021) (**Figura 1e**). Las precipitaciones y el caudal son monitoreados por la Dirección General de Aguas (DGA), entidad del Estado chileno responsable de medir y administrar los recursos hídricos. En este contexto, el área de estudio cuenta con 97 estaciones automáticas fluviométricas ubicadas en diferentes porciones de las cuencas hidrográficas presentes en dicha área (**Figura 1a**).

MATERIALES Y MÉTODOS

Variables de caudal, clima y nieve

Se examinó cómo la nieve y las variables climáticas se relacionan con el caudal medio anual de las subcuencas seleccionadas de los Andes extratropicales de Chile desde el año 2003 al 2017 (**Tabla 1**). Este período de tiempo se seleccionó para que coincidiera con la extensión de las series temporales de caudal de observaciones directas (*in-situ*) de las estaciones automáticas fluviométricas de la DGA y los datos del producto de nieve MOD10A1 de MODIS. Para obtener las variables climáticas y de nieve, se utilizó Google Earth Engine (GEE)¹.

¹<https://explorer.earthengine.google.com/>

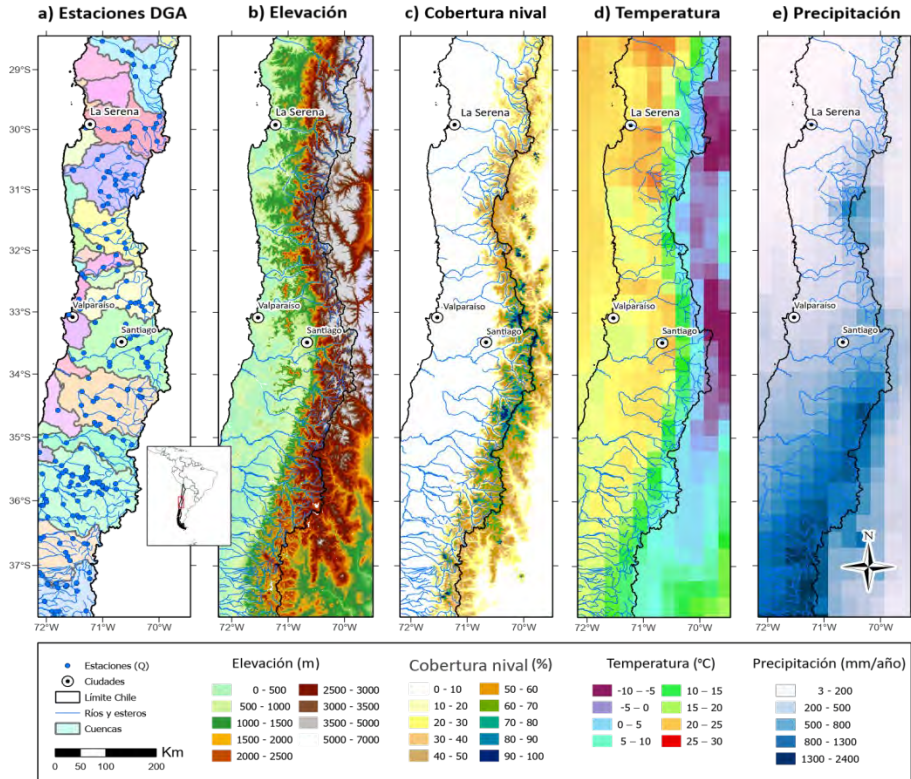


Figura 1. Descripción del Área de estudio que muestra: (a) Estaciones terrestres de caudal (círculos azules) de la DGA sobre los límites de las cuencas. (b) Elevación, basado en el Modelo Digital de Elevación (MDE) desarrollado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). (c) Índice de Cobertura de Nieve (ICN) promedio 2000-2020 basado en los productos diarios de MODIS de nieve MOD10A1 (500 m). (d) Temperatura media anual 2000-2020 elaborado en base a ERA5 (desarrollado por ECMWF/Servicio del Cambio Climático de Copernicus). (e) Precipitación media anual 2000-2020 elaborado en base al el producto 3B42 provisto por Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).
Elaboración propia.

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de geoprocésamiento espacial en la nube, de libre acceso a través de Internet, que proporciona un amplio catálogo de datos, herramientas y poder computacional necesarios para explorar y analizar un amplio conjunto de datos en escala de petabyte (Gorelick et al., 2017). Se utilizaron productos grillados para las variables de precipitación y temperatura, y para nieve

un producto diario de MODIS. Para los datos de caudales se utilizaron valores puntuales de estaciones terrestres de la DGA.

Variable Caudal

Para delimitar el área de estudio se utilizaron los datos de caudal (Q) de las estaciones fluviométricas de la DGA². De las 97 estaciones que se encuentran entre las latitudes 29° y 37°S, se preseleccionaron 47 estaciones bajo los criterios de ubicación en las cabeceras de cuencas de alta montaña y que no tuvieran aguas arribas intervención antrópica (bocatomas). Para cada una de las estaciones preseleccionadas, se evaluó la cantidad de los datos disponibles por mes desde los años 2003 al 2017. Se seleccionaron solo las estaciones con más de 25 mediciones diarias por mes y con la condición que cumpliera con al menos un 90% del total de los meses de la serie temporal. A excepción de las zonas donde existía poca representatividad de estaciones se flexibilizó el criterio para incluir aquellas estaciones que se encontraran entre 80-90% del total de los meses de la serie temporal con 25 mediciones diarias por mes. Como resultado, se seleccionaron las 10 estaciones en un amplio rango latitudinal (**Tabla 1**).

A partir de los datos de caudal de la DGA, se calculó el rendimiento anual y estacional según el año hidrológico para cada una de las 10 subcuencas. El año hidrológico en Chile comienza en abril y se dividió en cuatro estaciones: el otoño incluyó abril y marzo (AM), el invierno cubrió junio, julio y agosto (JJA), la primavera incluyó septiembre, octubre y noviembre (SON), y el verano fue definido por diciembre, enero, febrero y marzo (DEFM). Se calculó la dominancia del deshielo (DD) para cada subcuenca como la proporción entre el volumen de primavera más el verano y el total anual. A partir de los caudales diarios se determinó el volumen por estación y el total del año hidrológico. Dependiendo del valor de DD en cada una de las cuencas se clasificaron en cuatro categorías de dominancia de deshielo (CDD) de 1 a 4. Un CDD de 1 ($DD < 0,3$) está claramente dominado por precipitaciones líquidas. Un CDD de 2 ($0,3 < DD < 0,5$) y 3 ($0,5 < DD < 0,7$) tienen características mixtas dominadas por precipitaciones líquidas o deshielos, respectivamente. Finalmente se clasifica como

²<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

CDD de 4 ($DD > 0,7$) a un régimen hídrico claramente dominado por el deshielo (Fritze, Stewart, & Pebesma, 2011).

ID	Cod BNA	Nombre	Latitud	Longitud
1	3814003-5	Río Carmen En El Corral	-29,109	-70,414
2	4302001-3	Río Toro Antes Junta Río La Laguna	-29,971	-70,093
3	4501001-5	Río Hurtado En San Agustín	-30,462	-70,536
4	4703002-1	Río Choapa En Cuncumen	-31,967	-70,594
5	5414001-0	Río Putaendo En Resguardo Los Patos	-32,502	-70,581
6	5401003-6	Río Juncal En Juncal	-32,863	-70,168
7	5706001-8	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	-33,488	-70,137
8	6003001-4	Río Cachapoal 5 km. Aguas abajo Junta C.	-34,346	-70,376
9	7317005-2	Río Melado En El Salto	-35,884	-71,019
10	8372002-6	Río Polcura En Cuatro Junta	-37,107	-71,242

Tabla 1. Ubicación y área de drenaje de las estaciones de caudal utilizadas. Código BNA se refiere a la identificación chilena de estaciones de caudal. Latitud y longitud (UTM).

Para delimitar el área de descarga (subcuenca) para cada estación seleccionada, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) desarrollado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA, por sus siglas en inglés). El MDE de cada región de las estaciones seleccionadas fue descargado desde la página de Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE- Chile)³. En base al MDE se implementó la herramienta de “*Watershed*” en ArcGIS para generar la cuenca de drenaje correspondiente a cada estación seleccionada (**Figura 2**). Una vez generada cada subcuenca de drenaje, estas

³El MDE se descargó en <https://www.ide.cl>. El MDE es desarrollado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial y considera la siguiente información del producto: tamaño de escena de 85 km², con píxeles de 1 segundo de arco (~30 m). Las diferencias geoidales se restaron de los valores de altitud del MDE. Este producto considera un recorte del MDE con el límite Regional ODEPA para la exportación de los resultados (15 regiones) al formato JPG2000 en 16 bit y sin decimales. La escala aproximada, definida por el error vertical y por el tamaño del píxel, es de 1:25.000.

fueron exportadas a la plataforma GEE para su análisis con las distintas variables a considerar.

Variables climáticas

Se caracterizó el clima de cada subcuenca seleccionada utilizando datos de precipitación y temperatura para las fechas diarias desde el 1 de abril del 2003 al 31 de marzo del 2020. Para calcular los datos históricos de precipitación media se utilizó el producto 3B42 provisto por *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM)⁴. Este producto contiene una estimación de la precipitación (mm/h) con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial de 0,25 grados de arco. Los datos de temperatura se obtuvieron de ECMWF (*European Centre for Medium Range Weather Forecasts*)⁵ desarrollado por el reanálisis atmosférico del clima global ERA5 que ofrece una grilla nativa de ~30 km a escala global. Los datos de ERA5 están disponibles desde 1979 hasta tres meses en tiempo real.

Cobertura de nieve

Para calcular la variación de la cobertura de nieve de las subcuencas delimitadas, se utilizaron los productos diarios de MODIS de nieve MOD10A1 (500 m) a bordo del satélite Terra (Hall et al., 2016). Estos productos poseen una corrección radiométrica y geométrica de los datos del terreno Nivel 3 (L3), con una proyección original sinusoidal, pertenecientes a la Colección 6⁶. Este producto ofrece una banda del Índice Normalizado de Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés) (Hall et al., 2019) calculado a partir de las bandas verde e infrarrojo de onda corta. Primero se clasificaron los valores de NDSI en presencia/ausencia de nieve, considerando los píxeles mayores a 0,4 como nieve y los menores a ese valor como no nieve. En base al producto de nieve binario se determinó el promedio anual del área cubierta de

⁴<https://explorer.earthengine.google.com/#detail/TRMM%2F3B42>

⁵<https://explorer.earthengine.google.com/#detail/ECMWF%2FERA5%2FDAILY>

⁶<https://explorer.earthengine.google.com/#detail/MODIS%2F006%2FMOD10A1>

nieve (ACN) desde el año 2000 hasta el 2020 para el área total de las subcuencas seleccionadas.

Luego, se evaluó la frecuencia de cobertura de nieve donde utilizamos el Índice de Cobertura de Nieve (ICN o SCI, por sus siglas en inglés) considerando un análisis píxel por píxel para todas las imágenes disponibles (~7.000) que corresponden a la proporción de días con presencia de nieve (Richer et al., 2013). Se obtuvo el ICN anual para el año 2000 y 2020, para posteriormente realizar una resta entre las fechas para evidenciar los cambios en la frecuencia de nieve.

Tipo	Variable	Fuente	Resolución	Referencias
Caudal	Área de descarga	MDE ALOS, JAXA	12,5 m	Theobald, et al. 2015.
	Descarga (Q)	DGA	subcuenca	http://www.dga.cl
Clima	Precipitación (P)	3B42 TRMM, NASA	~30 km	Adler, G. et al., 2003.
	Temperatura (T)	ECMWF, Copernicus	~30 km	Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017).
Nieve	Área cubierta de nieve (ACN)	MOD10A1	500 m	Hall et al., 2016.

Tabla 2. Variables de caudal, clima y nieve examinadas, fuentes de datos, resolución espacial y referencias.

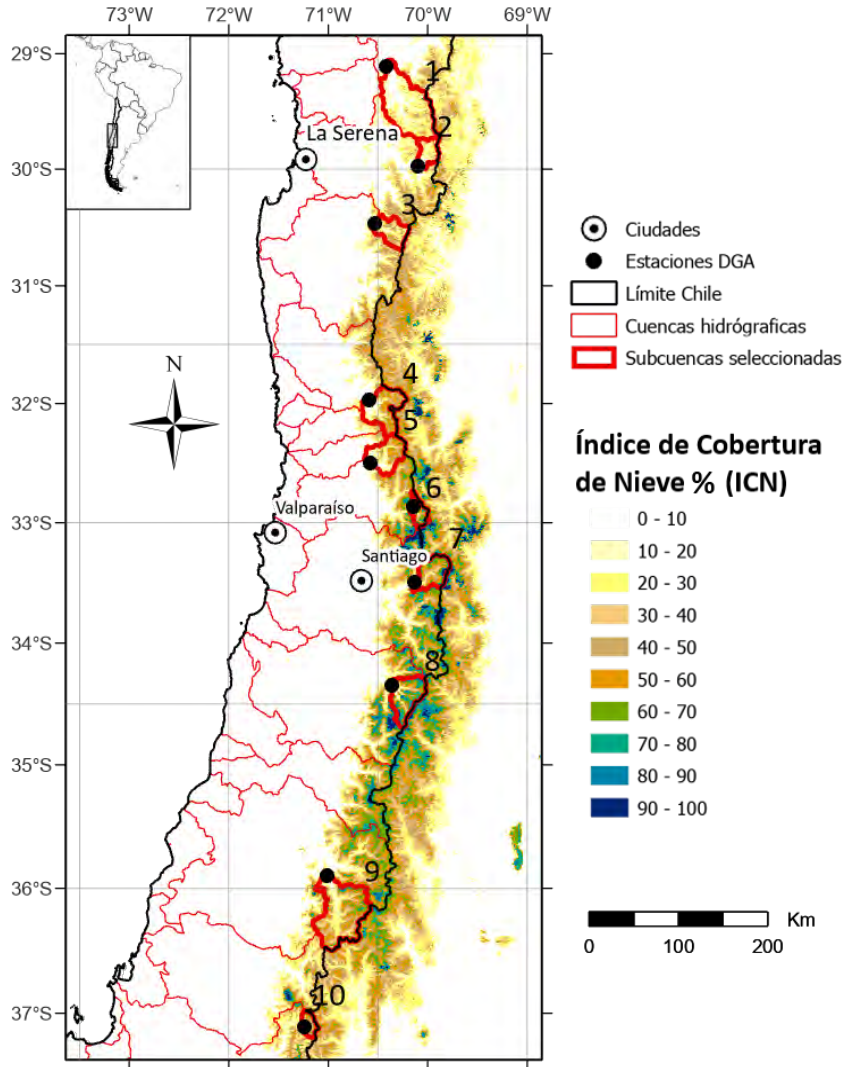


Figura 2. Ubicación de las estaciones fluviométricas seleccionadas y sus correspondientes áreas de drenaje (subcuencas) entre los 29°- 37°S. Las subcuencas están ubicadas en las cabeceras de las principales cuencas hidrográficas. La nomenclatura sobre cada cuenca representa el código asignado en el presente estudio. Elaboración Propia.

Relación cobertura de nieve y caudal

Se tomaron en cuenta todas las variables predictoras en periodos de tiempo mensual, estacional y anual de los años del 2003 al 2017 para cada subcuenca (Anexo). Para las variables grilladas temperatura (T) y precipitación (P) estos valores representan el promedio de todos los píxeles en el área de la subcuenca. Además, se calculó el ACN del promedio mensual de cada subcuenca para el total de la serie temporal. Todos estos análisis se realizaron en Google Earth Engine. Para determinar la relación estadística entre la cobertura de nieve y caudal, se utilizó la relación lineal entre estas variables (ACN y Q) y se calculó el coeficiente de determinación (R^2). Se determinaron los días de desfase entre el derretimiento de nieve y su respuesta en el caudal, para ello se calculó el R^2 desde cero días de desfase hasta un máximo de 210 días de desfase. A partir de estos datos de desfase diario se calculó una curva de R^2 para la serie temporal y se estableció el periodo de mayor R^2 para cada cuenca.

RESULTADOS

Relación caudal-cobertura de nieve

Las variables fisiográficas y climáticas promedios para el área de estudio ubicada en las subcuencas altoandinas entre los 29° y 37°S, se caracteriza por tener elevaciones que oscilan entre los 1500 a 4000 m. La temperatura tiene una fuerte variabilidad respecto a la elevación que oscila entre los -2° y 5°C de temperatura media anual. La precipitación anual promedio oscila entre los 15–115 mm/mes. El caudal promedio varía entre los 0,4 a 70 m³/s, el cual es influenciado por el área abarcada por cada subcuenca. El porcentaje promedio de la cobertura de nieve calculada abarca entre los 7 y 42% de cobertura de nieve, aumentando de norte a sur, hasta la latitud 34°S donde comienza a decrecer (**Tabla 3**).

El análisis por subcuencas revela una variabilidad tanto espacial como temporal con una fuerte estacionalidad de la cobertura de nieve y del caudal en el gradiente latitudinal desde los 29° hasta los 37°S (**Figura 4**). La magnitud del caudal anual promedio abarca un amplio rango entre 0,5 a 70 m³/s (**Figura 4a**). Mientras que el área cubierta de nieve va desde 0,5 a 45% de las subcuencas, mostrando los

porcentajes inferiores en los extremos del área de estudio y los superiores entre las latitudes 34° y 36,5°S (**Figura 4b**). La categoría de dominancia por cuenca se observan en la(**Figura 4c**). Todas las subcuencas hidrográficas observadas tienen una conexión con la nieve de moderada a fuerte (Anexo). Las subcuencas dominadas por el deshielo se concentran entre las latitudes 30° y 36°S, mientras que las subcuencas hidrográficas ubicadas en los extremos del área de estudio tanto al norte (29°-30° S) y al sur (36°-37,5° S) tienen una dominancia mixta, es decir, están dominadas tanto por las precipitaciones líquidas como por el deshielo de la nieve.

ID	Altura media (m)	T (°C)	P (mm/mes)	Q (m³/s)	ACN (m²)	Área (km²)
1	3772	5,59	16,5	1,99	7,83	2434,3
2	3904	-1,70	17,2	0,48	9,82	467,4
3	3723	4,27	39,1	1,99	18,03	672,4
4	3142	5,11	48,1	6,68	18,39	1131,6
5	3661	5,99	43,0	5,29	18,58	885,3
6	2920	0,77	48,1	4,69	14,74	343,1
7	3737	-2,11	50,1	2,21	27,61	783,4
8	2930	3,72	93,7	44,18	41,21	964,7
9	1964	6,36	96,8	69,19	23,59	2127,6
10	1995	5,43	111,3	2,00	13,00	235,4

Tabla 3. Descripción fisiográfica y climática promedio mensual de los años 2003-2017 por cada subcuenca del área de estudio.

A modo de ejemplo, se muestran dos de las subcuencas seleccionadas (**Figura 3**), una subcuenca con dominancia mixta (**Figura 3a**) y otra con dominancia nival (**Figura 3b**). Para el caso de una subcuenca de dominancia mixta es decir dominada por lluvia y a la vez nieve, se puede apreciar dos picos en la curva generada por el caudal (línea celeste), un pico que se correlaciona con el pico de las precipitaciones (barras verdes) y otro que se correlaciona con un desfase en el tiempo con respecto a la cobertura de nieve (ACN, línea azul). Indicando que esta subcuenca tiene características mixtas dominada por el deshielo (CDD = 3). Con respecto a las cuencas dominadas por nieve se aprecia un claro desfase entre el pico del caudal (línea celeste), con el pico de la

cobertura de nieve (línea azul) sugiriendo un comportamiento de dominancia nival (CDD = 4).

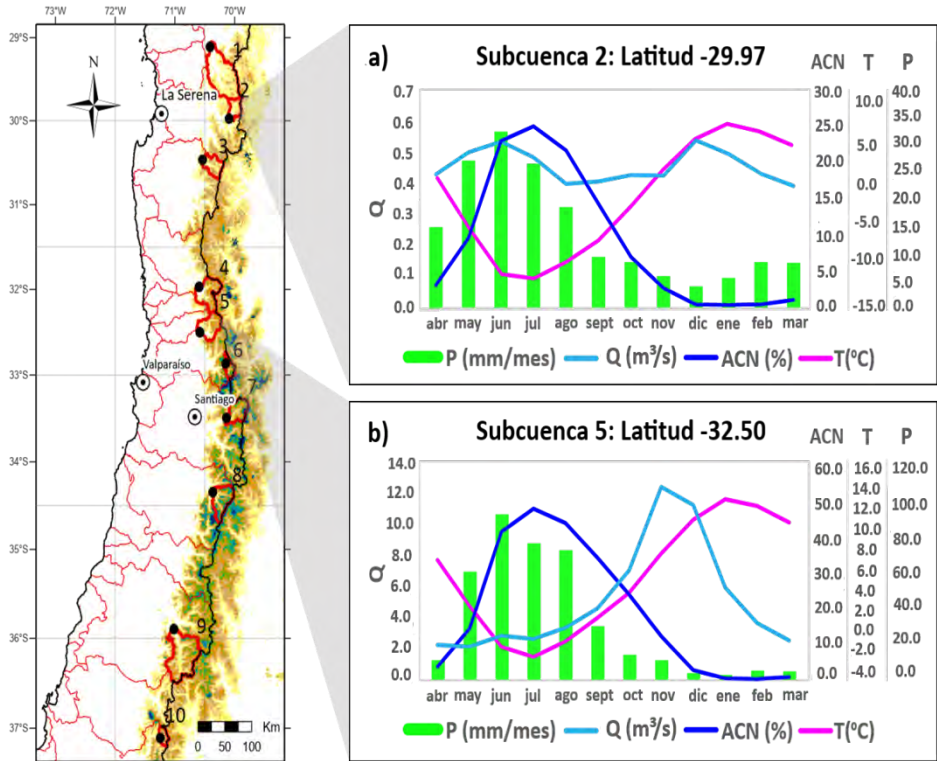


Figura 3. Ejemplo de clasificación de subcuencas de acuerdo a su régimen hidrológico. (a) Comportamiento de cuenca con características mixtas dominada por la nieve (CDD=3). (b) Comportamiento de una cuenca con dominancia nival (CDD=4).

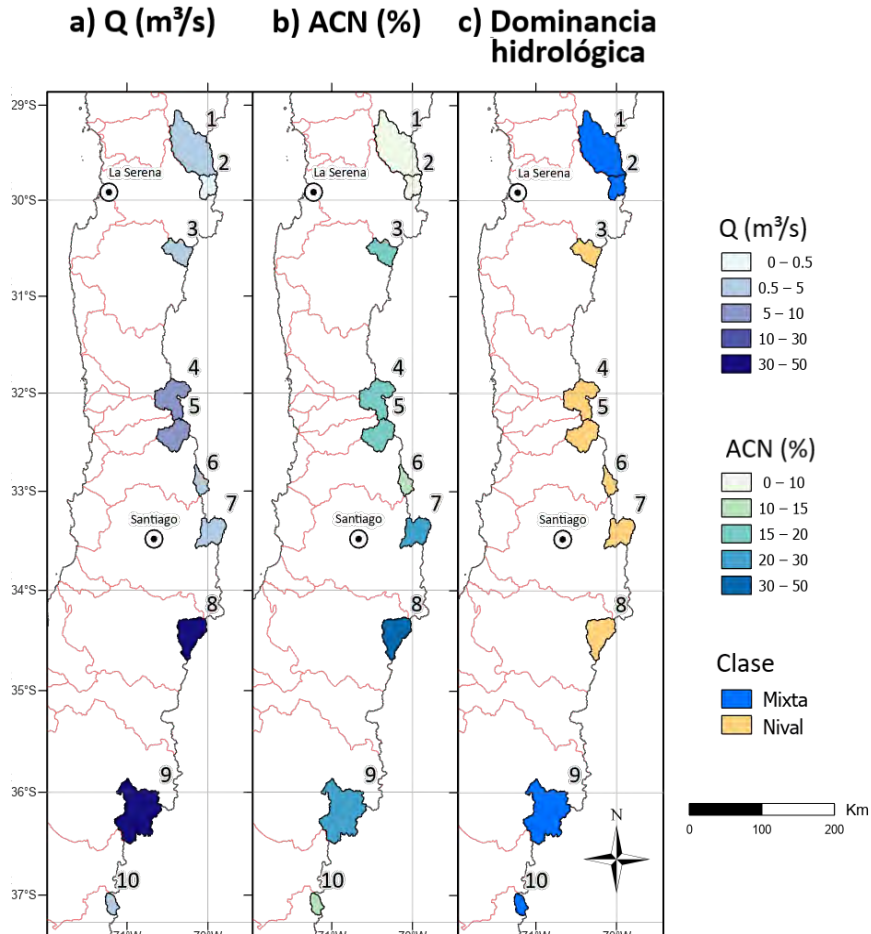


Figura 4. Variabilidad espacial del caudal y cobertura de nieve entre subcuencas para la serie temporal (2003-2017) del área de estudio. (a) Distribución espacial del caudal. (b) Distribución del área cubierta de nieve. (c) Dominancia hidrológica de cada subcuenca.

El análisis de coeficientes de determinación de la relación de cobertura de nieve y caudal, para un mismo día, presenta una fuerte variación dentro del área de estudio, con los mayores valores concentrados en la subcuenca 6 ($R^2 = 0,6-0,8$) y los menores valores entre las subcuencas 2, 4 y 5 ($R^2 = 0-0,1$) (Figura 6a). Para la evaluación del

desfase temporal consecutivo de las variables, se observó un patrón de variación de la relación R^2 . Mediante un análisis estadístico de proximidad se realizó una agrupación de las curvas con un comportamiento similar basado en la variación estacional del R^2 y se clasificaron en tres grupos que permiten zonificar la respuesta caudal-cobertura de nieve. El primer grupo, muestra una similitud basada en el patrón temporal de la variación del R^2 para las cuencas 3, 4, 5, 7 y 8, con R^2 mayores entre los 81 y 160 días, teniendo un promedio de desfase de 120 días, con un coeficiente de determinación promedio máximo de 0.72. El segundo grupo contiene a las subcuencas 1, 2, 9 y 10, donde sus mayores valores de R^2 se rondan entre los 20 y 80 días, con un promedio de desfase entre las cuencas de 60 días y un coeficiente de determinación promedio máximo de 0,47. Finalmente, el último grupo consiste en una subcuenca, la número 6, que tiene un patrón distinto en comparación con los dos grupos de cuencas descritos anteriormente. Su valor del coeficiente de determinación superior se encuentra entre los 150 y 180 días, siendo su promedio a los 161 días con un R^2 de 0,95.

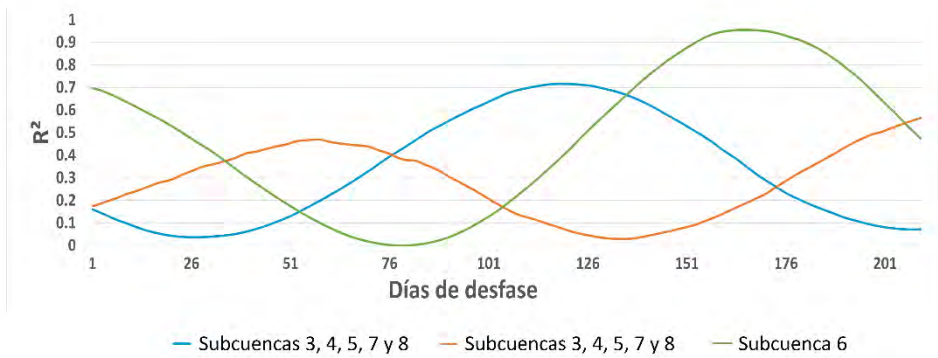


Figura 5. Evolución del R^2 al desfasar el caudal de 0 a 210 días para la serie temporal de 2003-2017 por grupos (promedio) según similitud del patrón de cada curva.

La distribución geográfica de cada subcuenca comparando los coeficientes de determinación con un desfase de 0 días (**Figura 6a**), registró el mayor coeficiente de determinación en los días de desfase (**Figura 6b**). Muestra claramente que al aplicar el desfase en el caudal el coeficiente de correlación aumenta, en valores que van entre los 0 a los 0.2 y sobre 0.5 (**Figuras 9a y 9b**).

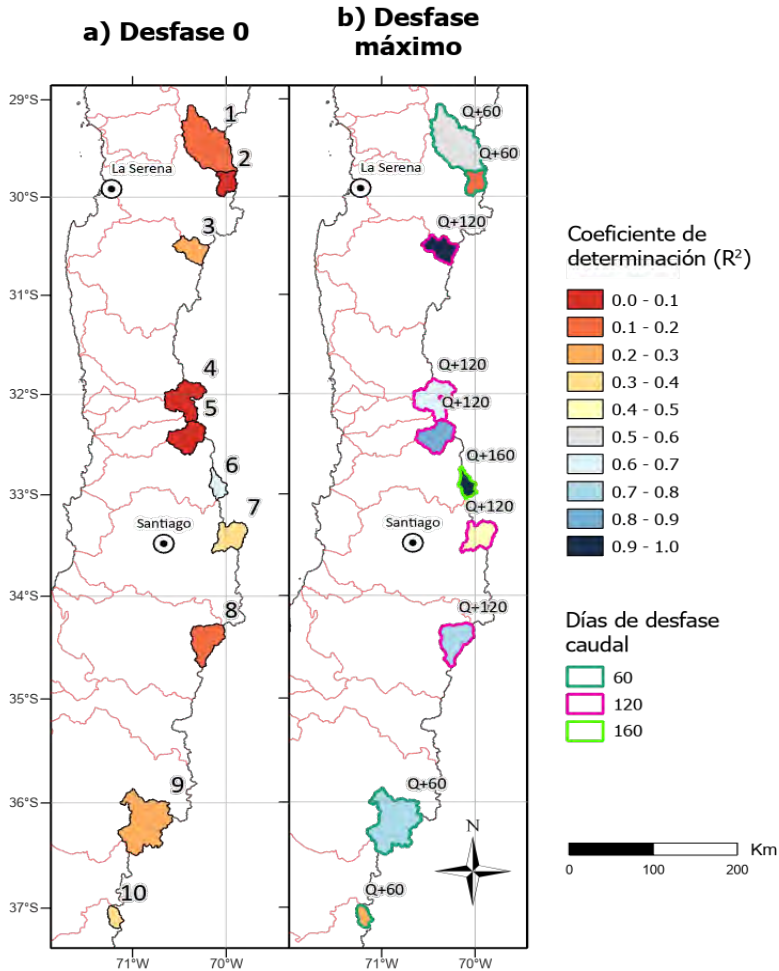


Figura 6. Coeficiente de determinación promedio de los años de estudio 2003-2017 por subcuenca para (a) Desfase de cero días y (b) Clasificación de subcuencas según días de desfase con el mayor coeficiente de determinación entre 60 días (Q+60), 120 días (Q+120) y 160 días (Q+160).

Finalmente, se realizó una zonificación de las subcuencas según el día de desfase que mostraban el mayor coeficiente de determinación (**Figura 6b**). Las subcuencas con un desfase de 60 días (en color cian, **Figura 6b**) en los extremos del área de estudio, tanto norte (~29°S) como sur (~37°S). Las subcuencas con un desfase

de 120 días (en color rosado, Figura 6b) ubicadas en la zona central entre los 30° – 35°S y la excepción, la subcuenca con 160 días de desfase (en color verde, **Figura 6b**) ubicada en los 33°S. La cuenca en cuestión es la más pequeña del estudio (km²) y la de menor altura, lo cual podría afectar la respuesta de los caudales al derretimiento de nieve, además de considerar una posible influencia glacial. Sin embargo, dicha subcuenca es la que logra el R² más alto del área de estudio.

Variabilidad espacio temporal de cobertura de nieve- caudal

A partir de la información de nieve se puede documentar la evolución de la cobertura de nieve (ACN) para las cuencas seleccionadas (**Figura 7**). En ella se observa una baja generalizada de la cobertura de nieve desde el año 2000, la cual se acentúa a partir del año 2016. Las subcuencas 6, 7, y 8 son las que poseen un régimen nival sustentado en la mayor cobertura de nieve y presentan una pendiente mayor en la reducción de la cobertura de nieve.

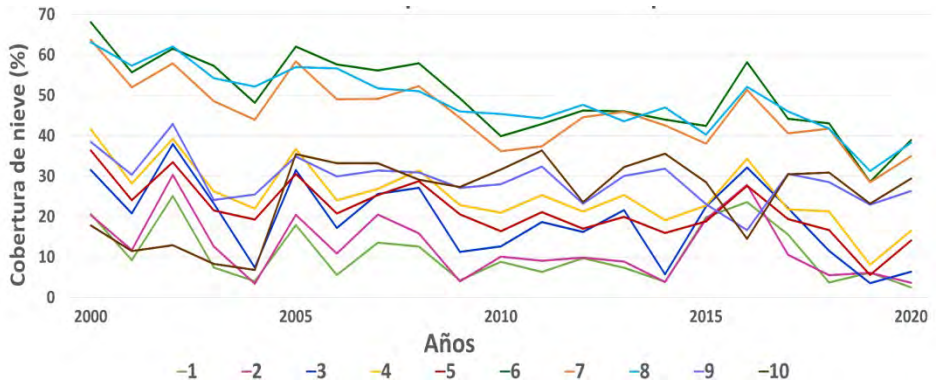


Figura 7. Gráfico ACN promedio anual para los años del 2000 al 2020 por subcuenca.

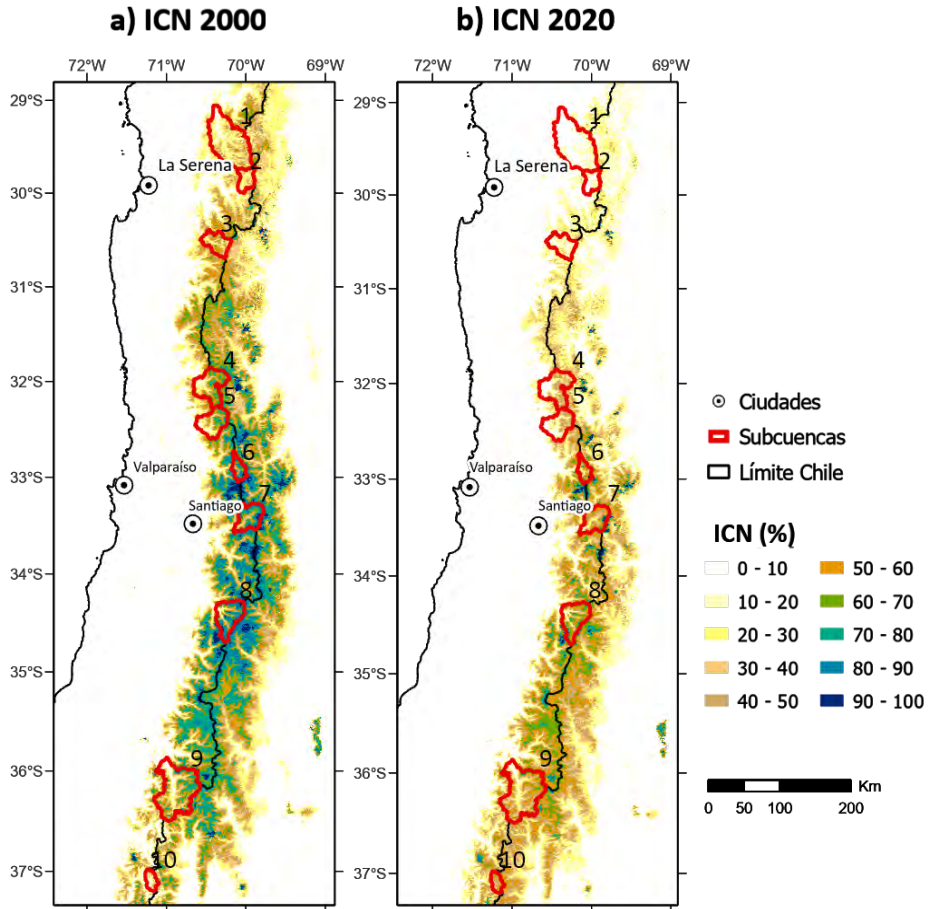


Figura 8. Mapa de variabilidad de ICN anual (a) ICN 2000, (b) ICN 2020.

La información temporal de la cobertura de nieve se complementó con la información de la frecuencia de nieve al comparar el año 2000 (**Figura 8a**) y el año 2020 (**Figura 8b**) y al realizar una diferencia entre dichos años (**Figura 9**). La disminución de la ICN varía tanto en latitud como en elevación. Se observa que la disminución de la cobertura de nieve no es solo en la zona altitudinal baja de nieve, sino que es generalizada en toda la superficie (**Figuras 8 y 9**). Las subcuencas con menor presencia de nieve (1, 2 y 3) están llegando a niveles mínimos. Las mayores

pérdidas se observan en la parte alta, donde las cuencas 4, 5, 6, 7 y 8 son las localizadas en la zona de mayor disminución tanto de la cobertura de nieve (ACN) como de la frecuencia de nieve (ICN). Cabe destacar el año 2016 donde se generó un aumento del ACN en la mayoría de las subcuencas, influenciado por el Niño (ENSO), excepto en las cuencas 9 y 10 con un comportamiento contrario. Lo anterior refuerza que si bien la cordillera de los Andes posee una señal de disminución de la frecuencia de nieve existen condiciones locales que pueden tener un comportamiento distinto.

La **Figura 9** evidencia que la disminución del caudal no es homogénea en toda el área estudiada. Las magnitudes de reducción del caudal más importantes se observan de norte a sur (29°- 33,5° S). Al mismo tiempo al visualizar las diferencias de ICN y caudal sobre puestas, se puede observar una mayor afectación en las cuencas 4, 5 y 7, cuencas de dominancia nival.

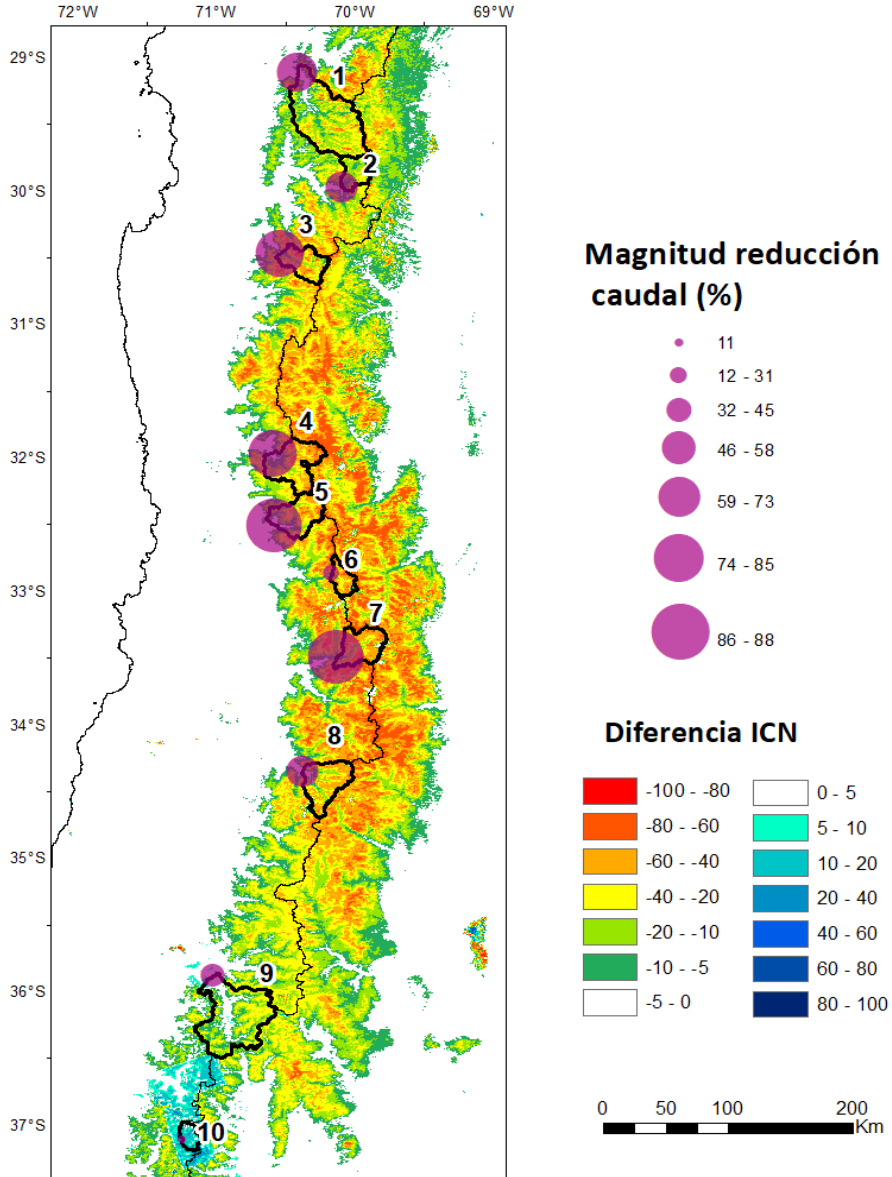


Figura 9. Diferencia ICN y caudal para el área de estudio años 2020-2000.

Curvas hipsométricas

Se realizó un análisis hipsométrico el cual determina el porcentaje del total del área de cuenca asociados a la altura (**Figura 10**). A partir de la curva generada se puede establecer la etapa de desarrollo geológico de una cuenca al evaluar la tasa de erosión y las etapas geomórficas (Méndez-Gutiérrez, et al, 2021). Las cuencas analizadas no presentan diferencias importantes y se encuentran en la etapa de equilibrio o madurez donde existe equilibrio entre la erosión presente y las fuerzas de cohesión que proporciona la roca madre. Las diferencias detectadas en la frecuencia de nieve no responden a una diferencia en la geomorfología de las cuencas.

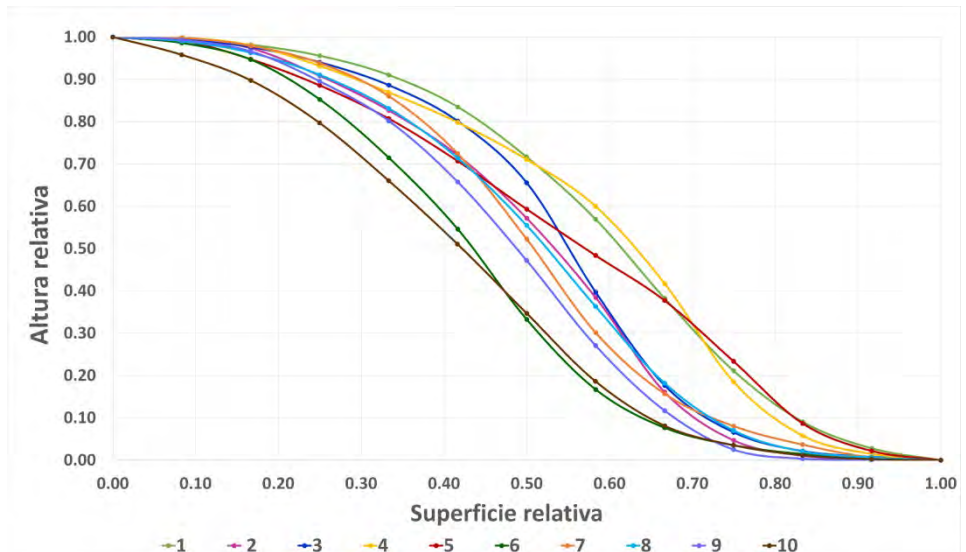


Figura 12. Curvas hipsométricas de las subcuencas seleccionadas

DISCUSIÓN

Relación caudal-cobertura de nieve

Estudios anteriores sobre cobertura de nieve y caudal han utilizado múltiples líneas de evidencia para respaldar la relación entre estas variables. El uso de datos satelitales MODIS y de descargas de caudales durante 10 años muestran que los mapas de cobertura de nieve fueron una herramienta útil para predecir el caudal en la Cordillera de Wind River, en el oeste central de Wyoming en Estados Unidos (Hall et al., 2012).

Para el área de estudio, en los Andes extratropicales de Chile los resultados de la presente investigación muestran una relación inversa entre el área cubierta de nieve y la producción de caudal. Dichos resultados son similares a los encontrados en otras áreas montañosas del mundo donde la relación entre caudal y deshielo ha sido utilizada para predecir caudales utilizando esta relación (Hall et al., 2012; Martinec et al., 2008; Molotch & Meromy, 2014). Trabajos previos en los Andes han documentado la relación entre los caudales promedios y las cobertura promedio de nieve (Masiokas, et al., 2013). Estos resultados confirman la dependencia de la cubierta de nieve para la producción de caudales y pueden ser la base para futuras investigaciones sobre la disponibilidad de caudales en las cuencas estudiadas a partir de predecir las coberturas de nieve en distintos escenarios.

No existe una clara distribución latitudinal sobre la magnitud de la relación entre caudal y cobertura de nieves (**Figura 6**). Los valores menores están ubicados tanto a los extremos norte y sur del área de estudio. Los valores mayores de R^2 se concentran en la zona central. Posiblemente la combinación entre elevación, la cobertura de nieve y el tamaño de la cuenca juegan un rol más importante que la latitud (**Figura 6**). Las subcuencas nivales presentan valores de R^2 más altos que las subcuencas mixtas. La subcuenca 6 (Juncal) presenta el valor mayor de R^2 y corresponde a las de menor superficie y altura, con suelos principalmente rocosos y con la presencia de glaciares en la cabecera de la cuenca.

La relación de caudal con los días de desfase para las subcuencas estudiadas presenta un rango amplio en el valor del coeficiente de correlación desde 0,5 a 0,9 (**Figura 6**). Lo anterior se puede deber a la participación de otros factores no

considerados al momento de obtener esta correlación, como por ejemplo variables fisiográficas del paisaje como la radiación solar, la orientación de las laderas, las pendientes, etc. Al parecer los factores que controlan el momento de mayor correlación (desfase) y la magnitud de la correlación son distintos. Por lo tanto, se requiere ahondar en los potenciales mecanismos subyacentes que participan en dicho fenómeno, aun cuando sabemos que es posible zonificar utilizando el momento de mayor correlación entre el derretimiento de nieve y el caudal generado (60, 120 y 160 días) (**Figura 6**). Sin embargo, los factores que controlan la magnitud de la correlación dentro de cada cuenca continúan siendo desconocidos.

Disminución de cobertura de nieve y caudal

El análisis de la serie temporal evidenció una disminución en general de la cobertura de nieve y caudal principalmente en la zona norte-centro del área de estudio (29°-33,5° S) (**Figura 9**), producto de la mega sequía que acontece esta región desde el 2010 donde se ha observado una baja en las precipitaciones y el aumento de temperatura (Garreaud et al., 2020). Latitudinalmente en el área de estudio los caudales van aumentando de norte a sur debido principalmente al aumento de la precipitaciones en el mismo sentido (**Figura 4a**). Con respecto a la distribución espacial de la cobertura de nieve (**Figura 4a**), esta también aumenta significativamente desde la latitud 29°S hasta los 34,5°S. Los menores valores de cobertura nival se encuentran en los extremos norte y sur del área de estudio aunque posiblemente por razones distintas (**Figura 4b**). La zona norte presenta menor precipitación (**Figura 1e**) lo cual probablemente explica la baja frecuencia de cobertura de nieve. A partir de los 34,5°S la altura de la cordillera disminuye más rápidamente que la isoterma 0°C por lo cual hay una menor superficie potencial para la acumulación de precipitaciones sólidas (Mardones & Bascuñan, 2019; Mernild et al., 2017).

El incremento de la temperatura tiene un efecto en la elevación de la línea de nieve, donde se divide si la precipitación será líquida o sólida. Sin embargo, el aumento de temperatura por sí solo no explica la disminución en las mayores alturas se mantiene por debajo del 0°C. La disminución de la precipitación debe ser la responsable de la disminución en altura, sin embargo la información de precipitación en altura

disponible no permite comprobar esta hipótesis. Nuevas metodologías para la adquisición de información deben ser integradas para abordar este tipo de pregunta. La sola instalación de más estaciones meteorológicas en tierra parece no ser la mejor respuesta en vista a la gran variabilidad espacial que presenta la disminución de la presencia de nieve (**Figura 9**).

En relación a los resultados obtenidos, se destaca el hecho que la teledetección permite examinar los procesos dinámicos que rigen la variabilidad de la cobertura de nieve desde una perspectiva espacio-temporal amplia (décadas). Esta característica, propia de la técnica, permite posicionar al cambio climático en un marco referencial adecuado, al menos en el ámbito espacial. En concreto, y en base a los antecedentes aportados por éste u otros estudios (Cordero et al., 2019; Cortés & Margulis, 2017; Saavedra et al., 2017; Saavedra et al., 2018), se destaca el hecho que potencialmente los regímenes hídricos de las cuencas altoandinas puedan cambiar en un futuro próximo (Cordero et al., 2019; Masiokas et al., 2020). Por ejemplo, en el contexto de la mega o hiper-sequía que se desarrolla en el área de estudio hace más de una década, algunas cuencas podrían pasar de ser de régimen mixto a solo nivales, o bien viceversa (Alvarez-Garretón et al., 2021; Stewart, 2009). También están los fenómenos climáticos como las bajas segregadas y ríos-atmosféricos que cada vez son más frecuentes y ciertamente modifican la distribución y temporalidad de los montos de precipitación sólida o líquida para una área en particular (Aceituno et al., 2021). Por lo tanto, es de esperarse que fenómenos tales como aluviones e inundaciones también experimenten cambios en sus patrones de ocurrencia (e.g. frecuencia e intensidad) en este nuevo escenario climático. Es en este contexto en el cual los territorios deberán redefinir sus planes de desarrollo y gestión de desastres, para lo cual herramientas como la teledetección y en general el monitoreo ambiental se emplazan como alternativas acordes con la necesidad de establecer instrumentos de planificación *ad-hoc*.

CONCLUSIONES

El análisis por subcuencas del área de estudio (29°- 37°S) revela una variabilidad tanto espacial como temporal de la cobertura de nieve y caudal que pudo ser monitoreada a través de datos obtenidos por teledetección y observaciones de caudal en base a la red de monitoreo de la DGA. Esta investigación revela importantes antecedentes en virtud de destacar la relevancia de la precipitación sólida (nieve) en cotas altas y como los cambios climáticos y escenarios de sequía pueden estar alterando la disponibilidad de esta reserva estacional, la cual es relevante en períodos secos o estivales. Se observó que para esta área de los Andes extratropicales de Chile se muestra una señal de disminución de la frecuencia de nieve y cobertura de nieve, no obstante existen condiciones locales que pueden tener un comportamiento distinto. Al parecer la disminución de la frecuencia de nieve no solo es un efecto del aumento de la temperatura sino que además la disminución en la precipitación juega un rol importante. En este contexto, el uso de la teledetección en la caracterización y monitoreo de la cobertura de nieve en áreas remotas, como lo son las cuencas altoandinas, resulta ser apropiado ya que no solo reduce considerablemente el costo en la obtención de este dato, esto al ser de libre acceso sino que también permite un monitoreo continuo espacio-temporal capaz de registrar cambios para la gestión integrada y oportuna de cuencas para el desarrollo de planes acordes a la sustentabilidad y reducción del riesgo de desastres.

Aunque nuestro estudio no se basó en predecir los caudales, esta aproximación es una metodología promisoriosa que entregó correlaciones sobre 0,8 en el coeficiente de determinación. El rango de R^2 encontrados por subcuenca no permite establecer una ecuación general por lo tanto estos deben ser estudiados más ampliamente con otros factores que controlan la relación cobertura de nieve-caudal (e.g. información fisiográfica como elevación, exposición, cobertura de suelo, geología), de los cuales la teledetección promete muchas potencialidades.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de los proyectos FONDEF ID20i10058 y Formación de Semilleros de Investigación de la Universidad de Playa Ancha.

BIBLIOGRAFÍA

Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Climate and Weather in Chile. In B. Fernández & J. Gironás (Eds.), *Water Resources of Chile* (pp. 7-29). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_2

Adam, J. C., Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (2009). Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrological processes*, 23(7), 962-972. <https://doi.org/10.1002/hyp.7201>

Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.-P., Janowiak, J., . . . Nelkin, E. (2003). The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). *Journal of Hydrometeorology*, 4(6), 1147-1167. [https://doi:10.1175/1525-7541\(2003\)004<1147:Tvgpcp>2.0.Co;2](https://doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:Tvgpcp>2.0.Co;2)
Alizadeh, Z., Yazdi, J., Kim, J. H., & Al-Shamiri, A. K. (2018). Assessment of Machine Learning Techniques for Monthly Flow Prediction. *Water*, 10(11), 1676. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/11/1676>

Alvarez-Garretton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25(1), 429-446. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>

Aravena, J. C., & Luckman, B. H. (2009). Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(14), 2106-2120. <https://doi.org/10.1002/joc.1761>

Arsenault, K. R., Houser, P. R., & De Lannoy, G. J. M. (2014). Evaluation of the MODIS snow cover fraction product. *Hydrological processes*, 28(3), 980-998. <https://doi.org/10.1002/hyp.9636>

Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>

Bormann, K. J., Brown, R. D., Derksen, C., & Painter, T. H. (2018). Estimating snow-cover trends from space. *Nature Climate Change*, 8(11), 924-928. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0318-3>

Borsdorf, A., & Stadel, C. (2015). *The Andes: a geographical portrait*: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03530-7>

Cordero, R. R., Asencio, V., Feron, S., Damiani, A., Llanillo, P. J., Sepulveda, E., . . . 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), 16945-16945. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53486-7>

Cortés, G. (2010). *Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el río Juncal*. Departamento de Ingeniería Civil.

Cortés, G., & Margulis, S. (2017). Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31 year reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6859-6867. <https://doi.org/10.1002/2017GL073826>

Cortés, G., Vargas, X., & McPhee, J. (2011). Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology*, 405(1), 93-109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.013>

Deems, J. S., Painter, T. H., & Finnegan, D. C. (2013). Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59(215), 467-479. doi:<https://doi.org/10.3189/2013JogG12J154>

Dong, C. (2018). Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review. *Journal of Hydrology*, 561, 573-583. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.027>

Falvey, M., & Garreaud, R. (2007). Wintertime Precipitation Episodes in Central Chile: Associated Meteorological Conditions and Orographic Influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171-193. doi:<https://doi.org/10.1175/jhm562.1>

Farías-Barahona, D., Vivero, S., Casassa, G., Schaefer, M., Burger, F., Seehaus, T., . . . 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), 260. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/260>

Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., & López, D. (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S). *Water Resources Research*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2008WR006802>

Fernández, B., & Gironás, J. (2021). *Water Resources of Chile* (Vol. 8): Springer.

Fritze, H., Stewart, I. T., & Pebesma, E. (2011). Shifts in Western North American Snowmelt Runoff Regimes for the Recent Warm Decades. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 989-1006. <https://doi.org/10.1175/2011jhm1360.1>

Gao, F., Wang, Y., & Hu, X. (2019). Evaluation of the suitability of Landsat, MERIS, and MODIS for identifying spatial distribution patterns of total suspended matter from a self-organizing map (SOM) perspective. *CATENA*, 172, 699-710. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.031>

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>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Hall, D., & Riggs, G. A. (2007). Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological processes*, 21(12), 1534-1547. <https://doi.org/10.1002/hyp.6715>

Hall, D., Foster, J. L., DiGirolamo, N. E., & Riggs, G. A. (2012). Snow cover, snowmelt timing and stream power in the Wind River Range, Wyoming. *Geomorphology*, 137(1), 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.011>

Hall, D. K., Riggs, G. A., DiGirolamo, N. E., & Román, M. O. (2019). Evaluation of MODIS and VIIRS cloud-gap-filled snow-cover products for production of an Earth science data record. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23(12), 5227-5241. <https://doi.org/10.5194/hess-23-5227-2019>

IPCC. (2019). *IPCC Special Report on the ocean and cryosphere in a changing climate*.

Khatibi, R., Sivakumar, B., Ghorbani, M. A., Kisi, O., Koçak, K., & Farsadi Zadeh, D. (2012). Investigating chaos in river stage and discharge time series. *Journal of Hydrology*, 414-415, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.026>

Li, X., Jing, Y., Shen, H., & Zhang, L. (2019). The recent developments in cloud removal approaches of MODIS snow cover product. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23(5), 2401-2416. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2401-2019>

Lundquist, J. D., Dickerson-Lange, S., Gutmann, E., Jonas, T., Lumbrazo, C., & Reynolds, D. (2021). Snow interception modelling: Isolated observations have led to many land surface models lacking appropriate temperature sensitivities. *Hydrological processes*, 35(7), e14274. <https://doi.org/10.1002/hyp.14274>

Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2018). Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240-252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072>

Mardones Bascuñan, P. B. (2019). *Impactos del cambio climático en la altura de la isoterma 0° C sobre Chile Central, Chile*: Universidad de Chile.

Markstrom, S. L., Regan, R. S., Hay, L. E., Viger, R. J., Webb, R. M., Payn, R. A., & LaFontaine, J. H. (2015). PRMS-IV, the precipitation-runoff modeling system, version 4. *US Geological Survey Techniques and Methods*, 6, B7.

Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., . . . MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *frontiers in Earth Science*, 8(99). <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>

Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B., Christie, D., Betman, E., Le Quesne, C., . . . Prieto, M. (2013). *Recent and historic Andean snowpack and streamflow variations and vulnerability to water shortages in Central Chile and Central-western Argentina*.

Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B., Le Quesne, C., & Aravena, J. (2006). Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate*, 19(24), 6334-6352. <https://doi.org/10.1175/jcli3969.1>

Méndez-Gutiérrez, A. G., Corral-Rivas, S., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F., & Pompa-García, M. (2021). Morphometric analysis of El Salto watershed, Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.641>

McNamara, I., Nauditt, A., Zambrano-Bigiarini, M., Ribbe, L., & Hann, H. (2020). Modelling water resources for planning irrigation development in drought-prone southern Chile. *International Journal of Water Resources Development*, 1-26. <https://doi.org/10.1080/07900627.2020.1768828>

Mernild, S. H., Liston, G. E., Hiemstra, C. A., Malmros, J. K., Yde, J. C., & McPhee, J. (2017). The Andes Cordillera. Part I: snow distribution, properties, and trends (1979–2014). *International Journal of Climatology*, 37(4), 1680-1698. <https://doi.org/10.1002/joc.4804>

Mernild, S. H., Liston, G. E., Hiemstra, C. A., Yde, J. C., McPhee, J., & Malmros, J. K. (2017). The Andes Cordillera. Part II: Rio Olivares Basin snow conditions (1979–2014), central Chile. *International Journal of Climatology*, 37(4), 1699-1715. <https://doi.org/10.1002/joc.4828>

Molotch, N. P., & Meromy, L. (2014). Physiographic and climatic controls on snow cover persistence in the Sierra Nevada Mountains. *Hydrological processes*, 28(16), 4573-4586. <https://doi.org/10.1002/hyp.10254>

Pagano, T., & Garen, D. (2003). Use of Climate Information in Official Western US Water Supply Forecasts. *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 1-9. [https://doi.org/doi:10.1061/40685\(2003\)377](https://doi.org/doi:10.1061/40685(2003)377)

Ragettli, S., Cortés, G., McPhee, J., & Pellicciotti, F. (2014). An evaluation of approaches for modelling hydrological processes in high-elevation, glaciated Andean watersheds. *Hydrological processes*, 28(23), 5674-5695. <https://doi.org/10.1002/hyp.10055>

Rango, A., Martinec, J., & Roberts, R. (2008). Relative importance of glacier contributions to water supply in a changing climate. *World Resource Review*, 20(3), 233-251.

Rango, A., Salomonson, V. V., & Foster, J. L. (1977). Seasonal streamflow estimation in the Himalayan region employing meteorological satellite snow cover observations. *Water Resources Research*, 13(1), 109-112. <https://doi.org/10.1029/WR013i001p00109>

Richer, E., Kampf, S., Fassnacht, S., & Moore, C. (2013). Spatiotemporal index for analyzing controls on snow climatology: application in the Colorado Front Range. *Physical Geography*, 34(2), 85-107. <https://doi.org/10.1080/02723646.2013.787578>

Rojas, M. (2006). Multiply Nested Regional Climate Simulation for Southern South America: Sensitivity to Model Resolution. *Monthly Weather Review*, 134(8), 2208-2223. <https://doi.org/10.1175/mwr3167.1>

Saavedra, F. (2016). *Spatial and temporal variability of snow cover in the Andes Mountains and its influence on streamflow in snow dominant rivers*. Colorado State: University. Libraries.

Saavedra, F., Kampf, S., Fassnacht, S., & Sibold, J. (2017). A snow climatology of the Andes Mountains from MODIS snow cover data. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1526-1539. <https://doi.org/10.1002/joc.4795>

Saavedra, F., Kampf, S., Fassnacht, S., & Sibold, J. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. *The Cryosphere*, 12(3), 1027-1046. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018>

Shaw, T. E., Gascoin, S., Mendoza, P. A., Pellicciotti, F., & McPhee, J. (2020). Snow Depth Patterns in a High Mountain Andean Catchment from Satellite Optical Tristereoscopic Remote Sensing. *Water Resources Research*, 56(2), e2019WR024880. <https://doi.org/10.1029/2019WR024880>

Stewart, I. T. (2009). Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydrological processes*, 23(1), 78-94. <https://doi.org/10.1002/hyp.7128>

Theobald, D. M., Harrison-Atlas, D., Monahan, W. B., & Albano, C. M. (2015). Ecologically-Relevant Maps of Landforms and Physiographic Diversity for Climate Adaptation Planning. *PLOS ONE*, 10(12), e0143619. <http://doi:10.1371/journal.pone.0143619>

Tsai, Y.-L. S., Dietz, A., Oppelt, N., & Kuenzer, C. (2019). Wet and Dry Snow Detection Using Sentinel-1 SAR Data for Mountainous Areas with a Machine Learning Technique. *Remote Sensing*, 11(8), 895. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11080895>

Wałęga, A., & Rutkowska, A. (2015). Usefulness of the Modified NRCS-CN Method for the Assessment of Direct Runoff in a Mountain Catchment. *Acta Geophysica*, 63(5), 1423-1446. <http://dx.doi.org/10.1515/acgeo-2015-0043>

LOS AUTORES

Ana Hernández-Duarte es Magíster en Desarrollo Regional y Medio Ambiente, candidata a Doctora en Interdisciplinario en Ciencias Ambientales de la Universidad de Playa Ancha, posee experiencia en manejo de imágenes satelitales para el estudio de cambios de cobertura terrestre. Actualmente es docente de la carrera de Geografía de la Universidad de Playa Ancha, asistente de investigación del proyecto FONDEF IDeA I+D 2020 FONDEF ID20i10058 y Lab Manager del Laboratorio de Teledetección y Monitoreo Ambiental (TeleAmb). Se encuentra realizando su tesis de investigación doctoral sobre la interacción de perturbaciones y la recuperación del bosque esclerófilo de la zona central de Chile.

Jean-Pierre Francois es Biólogo y Licenciado en Biología de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Magíster en Ciencias de la Universidad de Chile y Doctor en Ciencias Naturales, mención en Geografía Física, de la Universidad de Colonia, Alemania. En la actualidad es Profesor asociado de la Facultad Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Playa Ancha (UPLA), en donde dicta clases en carreras de pregrado y posgrado. Su investigación se centra en comprender los cambios experimentados por los ecosistemas terrestres durante el posglacial (últimos 20.000 años), con especial énfasis en los procesos y mecanismos (ecológicos y climáticos) asociados a los cambios en la vegetación. Ha participado y forma parte de diferentes grupos de investigación nacionales y extranjeros, lo cual se ve reflejado en sus publicaciones.

Valentina Contreras es estudiante de la carrera de Geografía de la Universidad de Playa Ancha. Actualmente se encuentra realizando su tesis de investigación enfocada en el uso de algoritmos espacio temporales para reducir la presencia de nubes desde imágenes satelitales en la cuenca del río Aconcagua enmarcada en el proyecto FONDEF IDeA I+D 2020 ID20i10058 “Observatorio Satelital de Nieves”.

Flavia Saud es geóloga de la Universidad Andrés Bello. Actualmente se desempeña en el ámbito privado.

Freddy Saavedra Ingeniero agrónomo, PhD en Ciencias de la Tierra en *Colorado State University*, posee experiencia en manejo de imágenes satelitales específicamente en productos de nieve y cambios de cobertura de suelo. Actualmente se desempeña como docente de la carrera de Geografía e investigador y director del Laboratorio de Teledetección y Monitoreo Ambiental (TeleAmb) de la Universidad de Playa Ancha.

Hidrogeología y modelo conceptual del acuífero de Petorca en el sector alto de la cuenca homónima. Región de Valparaíso, Chile

Hydrogeology and aquifer conceptual model of Petorca's upper basin (Valparaíso, Chile)



Justinne Andrea Rybertt Goldammer  orcid.org/0000-0002-6564-2288

Universidad Andrés Bello (UNAB), Chile

 jrybertt.g@gmail.com

RESUMEN

En Chile, desde hace más de diez años, se vive un intenso proceso de sequía, siendo la zona central, donde se ubica la localidad de Petorca, una de las más afectadas. Es por esto, que el propósito del presente estudio es contribuir con información para mejorar la gestión hídrica de la cuenca, detallando el funcionamiento de la parte superior del acuífero de Petorca, el tipo de recarga que prima, la circulación del agua subterránea y los factores que afectan su composición y disponibilidad. Para lograrlo, se desarrollaron trabajos de recopilación de información y campañas de terreno, cuyos datos fueron utilizados para la formulación de mapas piezométricos, la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas, un balance hídrico entre los años 2010-2018 y finalmente, la elaboración del modelo conceptual del acuífero de Petorca.

Los resultados de estos análisis muestran que se trataría de un acuífero libre donde su configuración geométrica está controlada por estructuras regionales de rumbo NS a NW. Además, se plantea cómo las influencias tanto de factores naturales como antrópicos han generado una disminución tanto en la calidad como en la disponibilidad de aguas subterráneas a través del tiempo, siendo el factor humano el que ha generado un mayor impacto en las características de las aguas.

PALABRAS CLAVE: acuífero de Petorca, balance hídrico, modelo conceptual.

ABSTRACT

In Chile there has been an intense drought process for more than ten years, being the central area, where Petorca is located, one of the most affected. The purpose of this study is to contribute information to improve the water management of the basin, detailing the operation of the upper part of the Petorca aquifer, the type of recharge that prevails, the circulation of groundwater and the factors that affect its composition and availability. To achieve this, information gathering work and field campaigns were developed, the data of which were used for the formulation of piezometric maps, the hydrochemical characterization of groundwater, a water balance between the years 2010-2018 and finally, the elaboration of the model concept of the Petorca aquifer.

The results of the study reveal that the Petorca aquifer is unconfined, where its geometric configuration is controlled by regional structures from NS to NW strike. In addition, it is proposed that the influence of meteorological and anthropic factors has generated a decrease in the quality, availability of groundwater over time, the anthropic factors are the one that has generated the greatest impact on the natural characteristics of Groundwater.

KEYWORDS: hydrogeology, Petorca acuífer, underground water, water balance, conceptual model.

INTRODUCCIÓN

La importancia de las aguas subterráneas en la naturaleza se ve reflejada en la contribución de estas al ciclo hidrológico, además, es un recurso natural renovable y de esencial importancia para la civilización, se utiliza para el abastecimiento de agua potable tanto en viviendas individuales como en aglomeraciones urbanas, en proyectos agropecuarios y en muchas industrias consumidoras de grandes cantidades de agua, como la minería (Vélez, 1999).

La composición química del agua subterránea es el resultado de continuos procesos de interacción entre el agua de precipitación que se infiltra en el terreno y la litología por donde circula (González-Abraham, 2012). Se debe destacar el papel que desempeña el factor antrópico en la composición química de esta, puesto que la actividad del hombre causa un deterioro progresivo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (Fagundo, 2010).

En la comuna de Petorca, al igual que en muchos lugares del país, hay una fuerte escasez hídrica lo que ha provocado que el río Petorca se encuentre mayormente seco. Los principales usos de agua en esta zona son la agricultura de frutícolas, seguido de la industria minera y el abastecimiento de agua potable (INE, 2007). Sin embargo, la extracción es tal, que ha dejado algunos sectores sin agua para este último uso (Depto. de Recursos Hídricos, 2016).

Si bien, se conoce la problemática que afecta al valle de Petorca, en el sector alto de la cuenca sólo se dispone de datos parcelados de las características y/o propiedades del acuífero. Por lo que, no existe claridad de cómo es el funcionamiento de este, los materiales que lo componen y sus dimensiones, así como el movimiento de las aguas subterráneas y que factores lo controlan.

Según Cica *et al.* (1979) en la cuenca del río Petorca se reconoce en los sedimentos antiguos, un acuífero pobre y posibles acuíferos confinados, mientras que en la capa de sedimentos recientes situados en los primeros 5 a 30 m, se ubica un acuífero libre de mejores características. Cade-Idepe Consultores (2004), concuerda con Cica señalando que el espesor de los depósitos recientes, donde se ubica el acuífero superior, varía entre los 8 y 25 m. Por otro lado, en el Mapa Hidrogeológico Nacional sugieren que el espesor del acuífero superior tendría no más de 10 m, además, GCF Ingenieros Ltda. (2011) plantea que no existe una diferenciación clara de acuíferos, indicando que se observan napas predominantemente libres y sólo variaciones estratigráficas locales.

Definir el modelo conceptual hidrogeológico, realizar un balance hídrico y analizar la composición de las aguas del sector contribuirá a responder estas dudas, dicha información estará disponible para la comunidad y autoridades con el fin de avanzar hacia una gestión sostenible del uso del agua.

Gran parte de los resultados del presente artículo surgen del trabajo de Rybertt (2019).

Área de estudio

La zona de estudio (**Figura 1**) se ubica en el límite noreste de la Región de Valparaíso, comprende las tres primeras subcuencas de Petorca, es decir, Río Pedernales, Río Sobrante y Río Petorca Oriente, abarcando 1.018 km². Dentro de estas se encuentra

el acuífero de Petorca, limitado a los depósitos fluvio-aluviales con un área de 80,6 km².

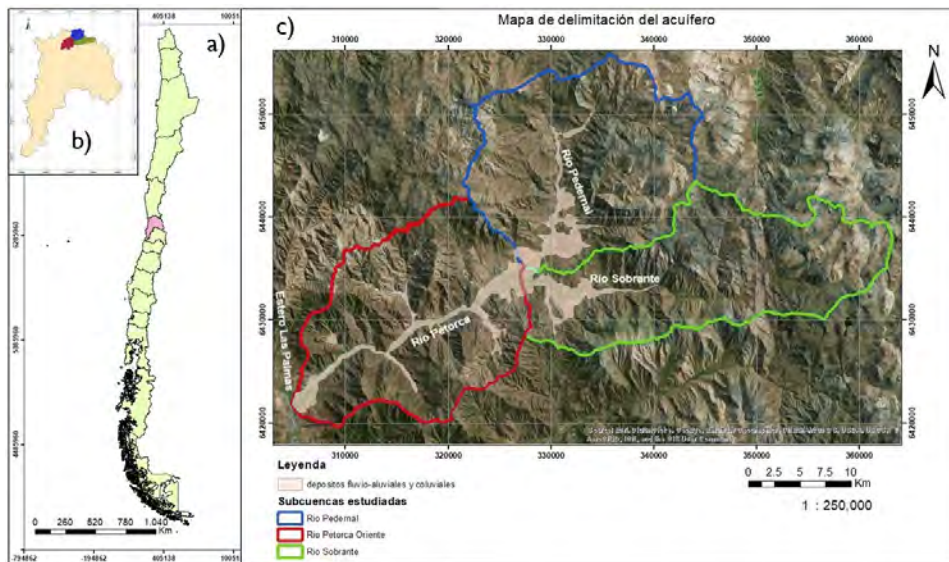


Figura 1. Localización del área de estudio, a) en rosado destaca la región de Valparaíso, b) y c) en rojo, verde y azul destacan las subcuencas estudiadas.

Geológicamente (**Figura 2**), se caracteriza por rocas estratificadas sedimentarias, volcánicas y volcanoclásticas de origen continental y unidades intrusivas, dispuestas en franjas NS con edades desde el Cretácico Inferior al Terciario Superior (Rivano, 1993). El basamento de esta cuenca es considerado prácticamente impermeable, salvo en casos particulares donde, debido al fracturamiento asociado a procesos tectónicos extensivos-compresivos u otras variables que aumenten el grado de permeabilidad del sistema, derivan en la formación de vertientes estructurales (GCF Ingenieros Ltda., 2011).

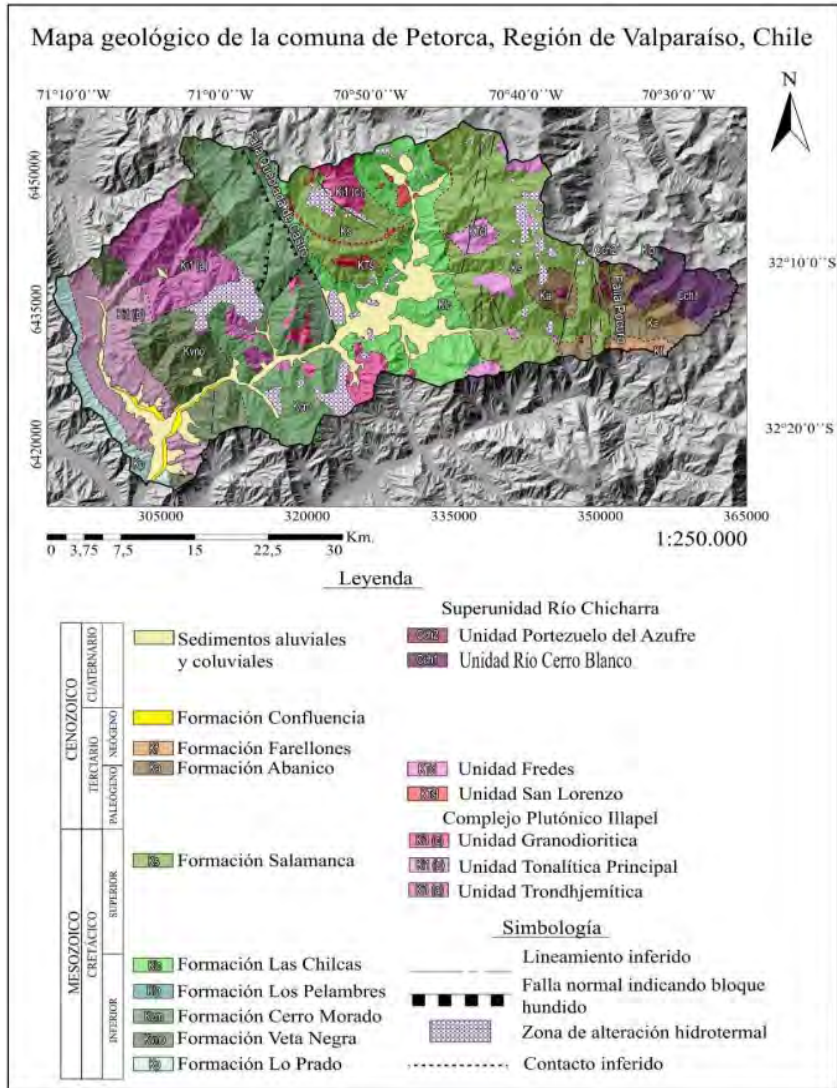


Figura 2. Mapa geológico de la comuna de Petorca (Pérez, 2018). Compilación a partir de (Rivano et al., 1993), (Camus et al., 1986), (Jara, 2013) y (Ferrando, 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las metodologías en este estudio se dividen por área de trabajo (**Figura 3**).



Figura 3. Fases metodológicas por área de estudio.

Piezometría

En primera instancia, se recopiló información desde 1995 a 2019 sobre niveles estáticos diarios medidos en estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas (**Anexo 1**). Estos datos fueron comparados con las precipitaciones ocurridas en el mismo periodo (**Figura 7**), obtenidas desde la base de datos CAMELS-CL (Alvarez-Garretton, 2018).

Durante la campaña de terreno se midieron pozos pertenecientes a comités de *Agua Potable Rural* (APR) y privados, en cada uno se registra la ubicación y altitud utilizando un GPS Garmin eTrex 10X (GCS WGS84) y la profundidad a la que se encuentra el agua empleando un pozómetro Solinist de 50 m (**Figura 4**). Con estos datos se realizan mapas piezométricos (**Figuras 5 y 6**) utilizando la herramienta de ponderación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés) de ArcGIS Desktop 10.8.1 interpolando los niveles piezométricos, se corrigen según interpretación propia.



Figura 4. Materiales utilizados en campañas de terreno. En a) se observa multiparámetro, pozómetro y bailer, en b) se muestra proceso de medición de parámetros fisicoquímicos.

Hidroquímica

Para estudiar la evolución hidroquímica del agua se recopilan datos a través de la estadística en línea de la Dirección General de Aguas (DGA) en tres estaciones de monitoreo de parámetros fisicoquímicos (**Anexo 1**). La información de iones mayoritarios comprende entre 1984 y 2006, momento en que se dejó de medir Bicarbonatos en todas ellas. No obstante, existen informes de seguimiento de calidad del agua subterránea en pozos de la APR Valle los Olmos realizado los años 2015, 2016 y 2017 utilizados para analizar la situación más actual de las aguas. Los datos son procesados en el programa gratuito Diagrammes 5.4 (SIMLER, 2018) donde se calcula el error analítico, la matriz de correlación de Pearson (**Anexo 2**) y se generan diagramas de Piper (**Figura 9**), Stiff (**Figura 11**) y binarios (**Figura 10**) para clasificar los tipos de agua presente.

Durante la campaña de terreno se toman muestras de agua desde los pozos a través de un Bailer o utilizando la bomba de extracción instalada. Dicha muestra es analizada con un multiparámetro Hanna HI 9828 (**Figura 4**), midiendo su pH, Conductividad eléctrica (CE), Total de Sólidos Disueltos (TSD), Temperatura, Potencial de Óxido Reducción (ORP) y Oxígeno disuelto (OD).

Balance hidrometeorológico 2010-2018

Se recopila información disponible sobre las unidades acuíferas presentes en el sector a partir de estudios anteriores y de expedientes de pozos provistos por la DGA obteniendo parámetros hidráulicos como permeabilidad y transmisividad.

Para la recopilación de datos meteorológicos, en el caso de las precipitaciones, se utiliza la red de estaciones DGA vía web de las que se extraen datos de precipitación diarios para los años establecidos y se calcula el promedio. Por otro lado, para la temperatura se combinan datos desde el 2010 hasta el 2016 a partir de CAMELS-CL y para los periodos 2017 y 2018 se utilizan los datos de la estación *Chincolco Liceo Agrícola* perteneciente a Dirección Meteorológica de Chile y la estación *Salamanca* ubicada fuera del área de estudio, elegida por presentar el mismo bioclima que el Valle de Petorca (Luebert, 2012). De las estaciones mencionadas (**Anexo 1**) se obtienen también datos de velocidad del viento, horas de sol, radiación y humedad relativa, los cuales son utilizados para el cálculo de la evapotranspiración (ETP).

En cuanto a la información agraria, para calcular el espesor radicular promedio de los cultivos presentes en el sector se consideran los paltos, nogales y cítricos como principales cultivos (Richard, 1998), para calcular la dotación de riego requerida en el total de los cultivos se valora la proporción de estos según el CIREN (2017).

El área de plantaciones varía considerablemente durante los años que abarca el balance hidrometeorológico, debido a esto y con el fin de comprobar la cantidad de hectáreas plantadas por año se realiza una clasificación de cultivos a través de un análisis de imágenes satelitales en el programa ENVI 5.6.1 En primer lugar, se descargaron imágenes de la plataforma USGS, luego se les realiza corrección atmosférica y una calibración radiométrica con el módulo matemática de bandas, hecho esto se ejecutaron distintas combinaciones de bandas para distinguir plantaciones agrícolas de la vegetación natural con tal de llevar a cabo una clasificación supervisada para lograr contabilizar el área de cultivos agrícolas presentes para cada año. Debido a que no distingue entre tipo de árbol, se utiliza la proporción de cultivos obtenido de la encuesta del CIREN 2017, donde paltos representan un 64.56%, cítricos un 22.64% y nogales un 11.30% sumando en total un 98.5% del área total cultivada. Finalmente, esta información se cruza con los requerimientos hídricos mensuales de paltos (Ovalle J. M, 2012), de cítricos (Castillo, 2008) y de nogales (Lobos G, 2017).

A partir del balance hidrometeorológico se estima el caudal de agua proveniente de la precipitación y del retorno de riego que se recarga efectivamente por año en el sistema. Para su cálculo se ha utilizado el programa gratuito EASYBAL (Vazquez & Serrano, 2013) registrando los datos diarios antes mencionados. Además, se deben ingresar los valores de capacidad de campo, punto de marchitez y laminación los cuales se estimaron según el tipo de suelo realizando una clasificación textural (Schroeder 1994). El programa entrega valores anuales de recarga efectiva en [mm/año] sin considerar el área de estudio, para incluirla se debe multiplicar la recarga por la cantidad de hectáreas, utilizando la superficie de las tres subcuencas (101.857 ha) suponiendo que las precipitaciones en toda la hoya orográfica escurrirían hacia los depósitos del valle.

Balance hídrico 2010-2018

Para efectos del Balance Hídrico se asume que las laderas son impermeables de manera que se descartan entradas de agua laterales. Además, al estar el río en su mayor parte seco, se omite una relación río-acuífero. Por otro lado, para poder hacer una comparación entre los caudales de entrada y de salida en la zona de estudio se utilizan datos de estaciones fluviométricas pertenecientes a la DGA. Los parámetros considerados para este Balance Hídrico serán:

Entradas: Recarga obtenida a partir del balance hidrometeorológico; pérdidas por abastecimiento y alcantarillado.

Salidas: Extracciones (bombeos); salidas de agua subterránea por el límite suroeste de la zona de estudio.

Para calcular las pérdidas por abastecimiento y alcantarillado, se obtiene la cantidad de habitantes en el área de estudio (Censo, 2017) y considerando que según la Superintendencia de Servicios Sanitarios (2008) el requerimiento de agua para una persona es de 150 L/día, se calcula la cantidad de agua requerida anualmente por los habitantes del sector. Finalmente, se realiza el cálculo total considerando que las pérdidas que ocurren a partir de esta dotación han sido fijadas en un 15% por abastecimiento y de un 5% por alcantarillado (Girardi & Recio, 2015).

Las extracciones se obtuvieron a partir de los Derechos de Agua otorgados en la zona de estudio disponibles en la Dirección General de Aguas. El valor de extracciones para

los años que considera el balance hídrico se calcula sumando los caudales promedio anual de cada propietario en [hm³/año].

El cálculo de la salida de agua subterránea por el límite suroeste implica utilizar la fórmula del caudal en una sección de paso (Custodio & Llamas, 1996):

$$Q = K * i * b * L \quad (1)$$

Siendo: K, la conductividad hidráulica

i, el gradiente hidráulico

b, el espesor saturado

L, la longitud transversal conformada por los depósitos fluvio-aluviales.

En el presente trabajo, los valores K y b tienen orígenes bibliográficos, mientras que i es calculado con datos obtenidos en terreno y L fue medido remotamente a partir de ArcGis.

Modelo Conceptual

A partir de la recopilación y unificación de datos geofísicos (perfiles gravimétricos), estratigráficos (columnas de pozos), estructurales e hidrogeológicos se genera un modelo conceptual que incorpora las distintas variables tratando de acercarse a la geometría y dinámica real del acuífero de Petorca en el sector de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Piezometría

El flujo del agua subterránea es paralelo a la línea de río (**Figura 5**) debido a que las laderas de los cerros adyacentes fueron consideradas impermeables.

Las aguas superficiales se ubican principalmente en las partes más altas del acuífero en los ríos Pedernal y Sobrante, esto puede deberse a que los depósitos fluvio-

aluviales en estas zonas poseen un espesor mucho menor al promedio, además, hay menos captaciones de agua ya que vive menos gente y no hay grandes plantaciones. Entre La Ñipa y Hierro Viejo es el único lugar aguas abajo donde se encontró agua superficial, lo que indicaría un comportamiento local efluente por parte del río en este sector.

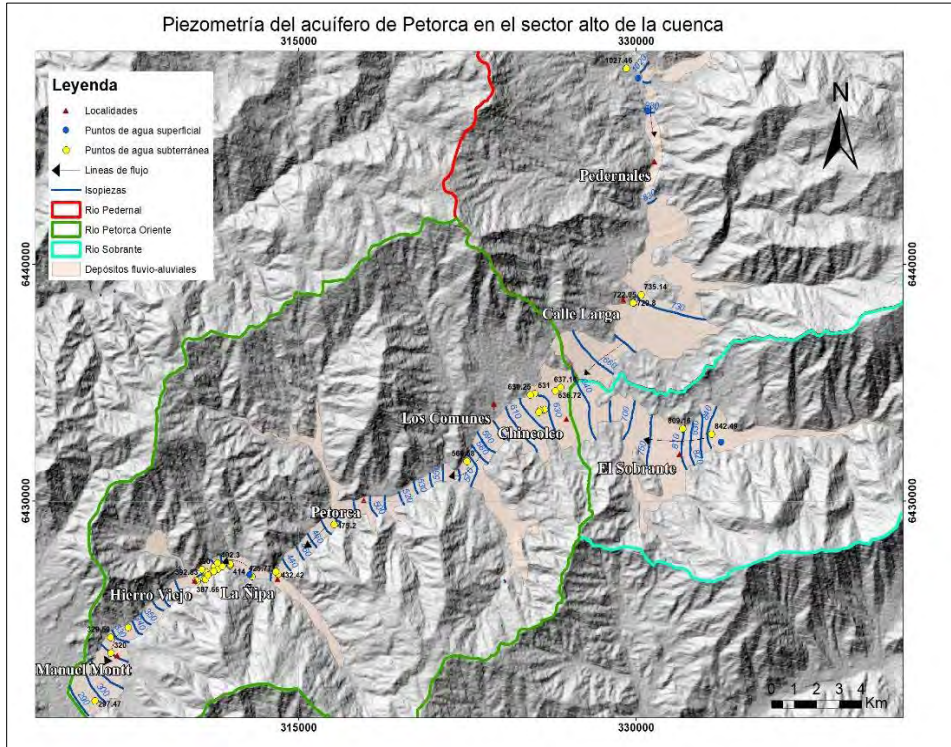


Figura 5. Mapa de isopiezas del sector alto del acuífero de Petorca en base a imagen satelital DEM.

En el área de Hierro Viejo, se obtuvo mayor detalle en cuanto a la piezometría, en la **Figura 6** es posible notar un aumento del gradiente hidráulico, además, se aprecia una vertiente subterránea en el borde sur de los depósitos fluvio-aluviales, esto podría deberse a estructuras internas del cerro como fracturamiento de las rocas que generen reservorios de agua. Estudiar estos sistemas puede ser de gran ayuda

en el futuro, como lo hizo Taucare et al (2021) en la zona central de Chile y los distintos trabajos impulsados por Linda Daniele recientemente.

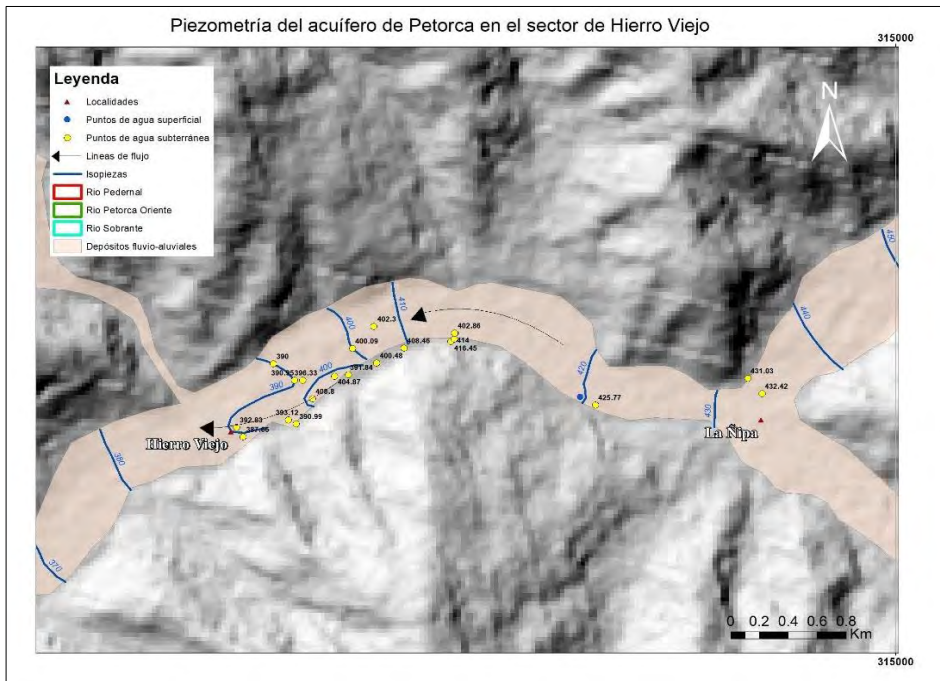


Figura 6. Mapa de isopiezas en el sector de Hierro Viejo en base a imagen satelital DEM.

Al comparar las precipitaciones anuales con los niveles estáticos de los pozos en el sector de Petorca Oriente (**Figura 7**), se puede notar que existe una correlación entre los niveles en los pozos y la cantidad de precipitaciones, aumentando considerablemente en años lluviosos y disminuyendo cuando las precipitaciones van a la baja. Sin embargo, hay ciertas variaciones que son difícilmente asociables a precipitaciones y que podrían estar relacionadas a grandes bombeos cercanos al pozo de monitoreo, como podría ser el caso de la estación de Agua Potable Polcura en el año 2017.

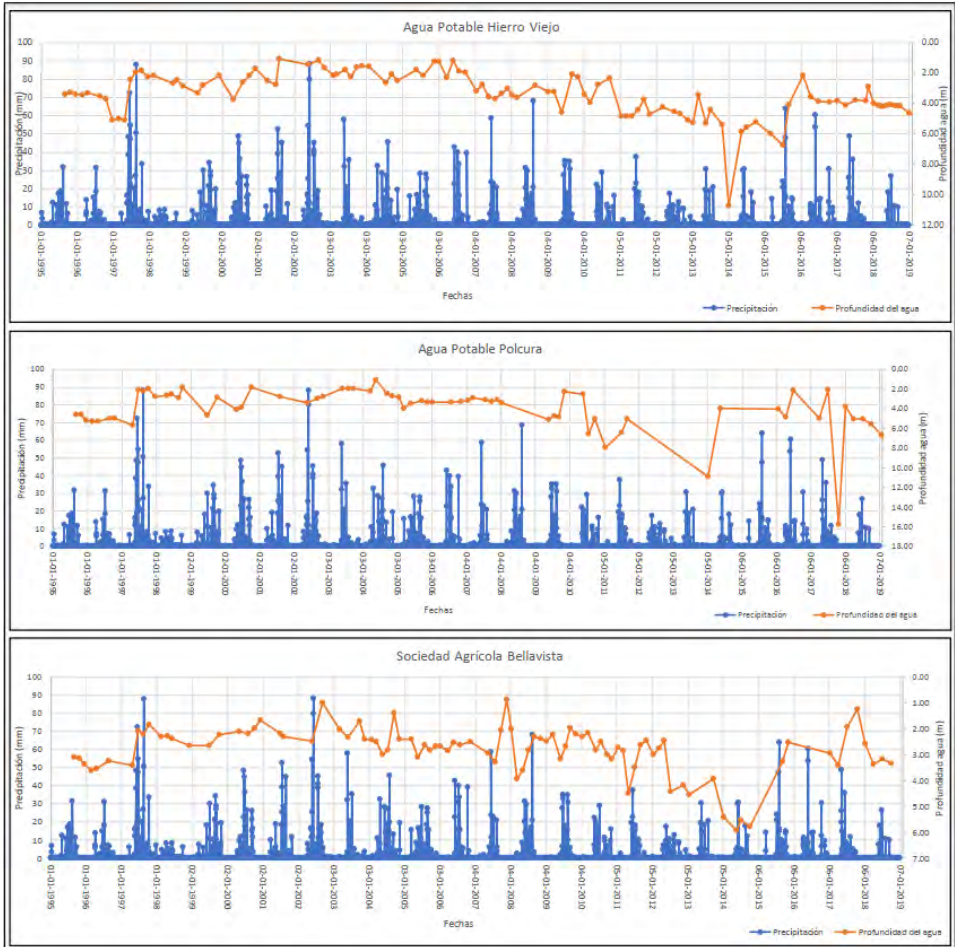


Figura 7. Comparación cronológica entre precipitaciones (azul) y niveles estáticos (naranja) de las estaciones comprendidas en la subcuenca Río Petorca Oriente.

En el sector de Pedernal (**Figura 8**), específicamente en Los Olmos Chalaco se puede observar claramente una ciclicidad estacional, donde, en periodos secos la piezometría baja y en periodos de lluvia y derretimiento de la nieve acumulada el nivel del agua subterránea aumenta. Al igual que en A.P. Polcura en 2017, en Escuela Chalaco en octubre de 1999 hay una disminución del nivel estático que no es asociable a una baja de precipitaciones.

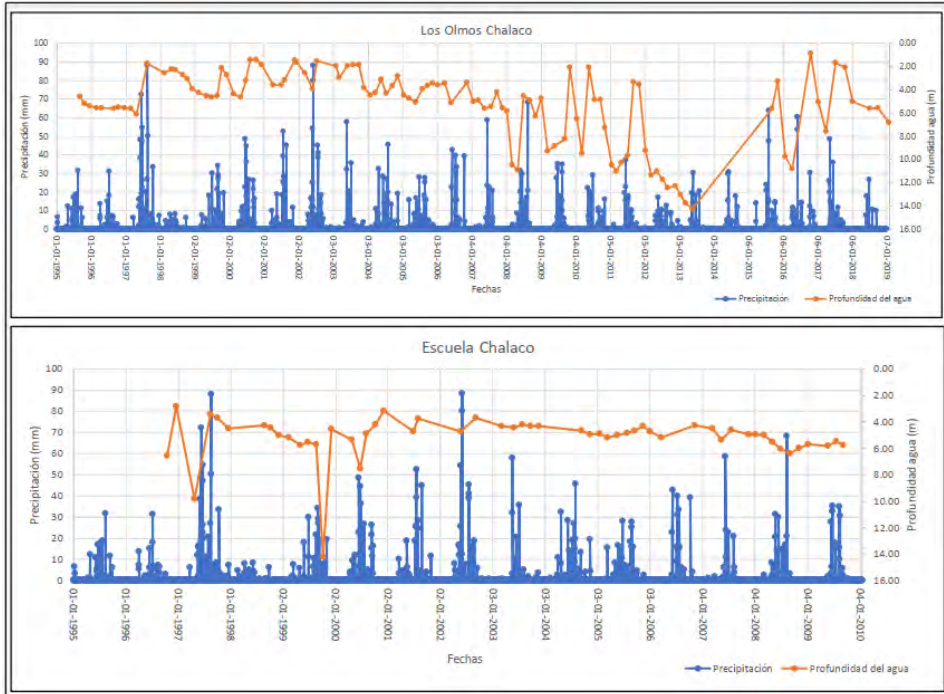


Figura 8. Comparación cronológica entre precipitaciones (azul) y niveles estáticos (naranja) de las estaciones comprendidas en la subcuenca Río Pedernal.

En el caso de Sobrante, no es posible hacer un buen análisis debido a la baja cantidad de datos.

En cuanto a la variación de almacenamiento, al observar sólo los últimos 5 años en los pozos de monitoreo se tiene que el nivel piezométrico ha aumentado, mostrando una variación positiva, sin embargo, esto es un aumento relativo ya que si consideramos desde el año 1995 hasta la actualidad la variación es negativa, es decir, la cantidad de agua almacenada ha disminuido.

Hidroquímica

La **temperatura** varía entre 16.86 y 21.54 °C siendo los pozos más superficiales los que poseen aguas con temperaturas más elevadas. El **pH** varía entre 7.02 y 7.72 con una distribución bastante homogénea dentro de la zona de estudio. El potencial oxido-reductor (**ORP**), tiene en promedio 203.74 mV, siendo Hierro viejo el sector que presenta valores más bajos con 187 mV, mientras que en el Valle de Pedernal los valores alcanzan los 293 mV, al ser todas las mediciones positivas podría indicar un ambiente oxidante. La conductividad eléctrica (**CE**), presenta un mínimo de 239 uS/cm en el sector de Pedegua y un máximo de 770 uS/cm en la localidad de Hierro Viejo, a partir de la junta de los ríos Pedernal y Sobrante los valores de CE aumentan considerablemente, esto puede deberse a la mayor área de plantaciones, las cuales al ocupar fertilizantes y pesticidas constituyen una gran fuente de sales minerales, o bien, por la actividad minera que se mantiene activa en la zona pudiendo aportar otro tipo de elementos.

Los valores de **sólidos totales disueltos (SDT)**, fluctúan entre 132 y 496 ppm siendo el sector de Sobrante el que posee menores valores y Calle Larga los mayores. Finalmente, el oxígeno disuelto (**OD**) va desde 1.03 a 6.91 ppm, disminuyendo a medida que se avanza por el acuífero, el oxígeno se consume con facilidad si existen sustancias oxidantes tales como materia orgánica, Fe^{+2} , NH_4^+ , NO_2^- , de manera que se infiere que la disminución en este parámetro puede deberse a mayores concentraciones urbanas y plantaciones agrícolas que aportan en sustancias oxidantes que consuman el oxígeno en diferentes reacciones.

Por otro lado, a partir de los iones mayoritarios, se elabora un diagrama de Piper (**Figura 9**), donde se reconocen aguas principalmente Bicarbonatadas Cállicas en río Sobrante, aguas bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas en río Pedernal y, por último, aguas Bicarbonatadas calcio-magnésicas en río Petorca. Estas clasificaciones concuerdan con la geología del sector, compuesta principalmente por rocas volcano-sedimentarias y por cuerpos intrusivos graníticos de composición intermedia, además las aguas bicarbonatadas son representativas de zonas de recarga por precipitación.

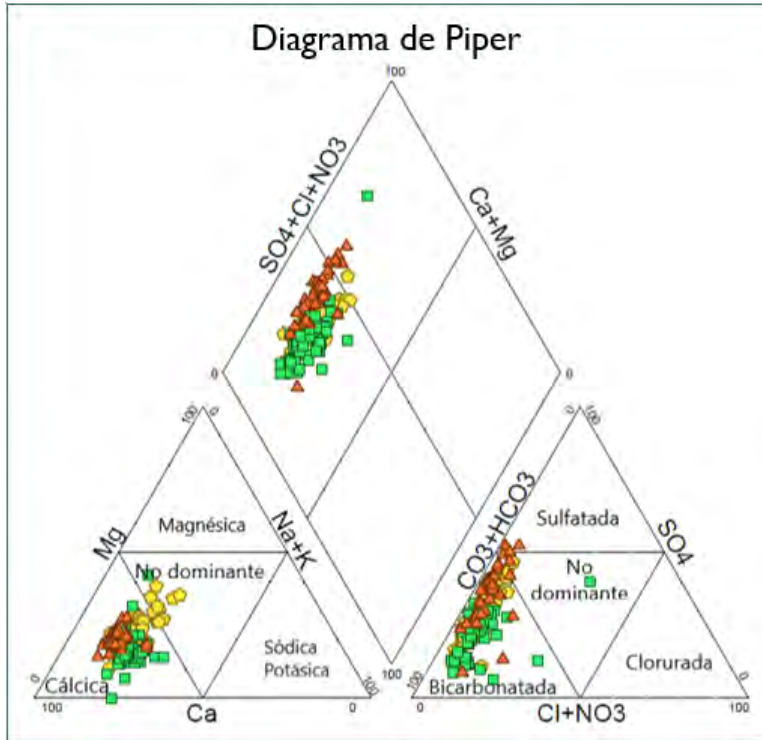


Figura 9. Diagrama de Piper con datos obtenidos a partir de la DGA. En triángulos naranjos se representa Río Pedernal en Tejada, en cuadrados verdes Río Sobrante en Piñadero, en pentágonos amarillos Río Petorca en Petorca.

De acuerdo con la relación rCl^-/HCO_3^- (**Figura 10a**), el gráfico indica la presencia de aguas poco evolucionadas, ubicándose las más jóvenes en los sectores de Sobrante y Pedernales, mientras que las del río Petorca tienen valores más altos indicando aguas más evolucionadas, esto concuerda con la geografía ya que las dos primeras son afluentes del río Petorca. Por otra parte, los resultados de la relación rNa^+/Cl^- (**Figura 10b**) y la matriz de correlación de Pearson (**Anexo 2**) sugieren que los procesos hidrogeoquímicos dominantes en la zona de estudio son el resultado de la meteorización de silicatos y feldespatos lo cual coincide con la geología del sector, ya que los materiales que conforman el acuífero se constituyen de las rocas

adyacentes, compuestas en su mayoría por rocas volcánicas e intrusivos de composiciones intermedias, es decir, que poseen una considerable proporción de los minerales mencionados.

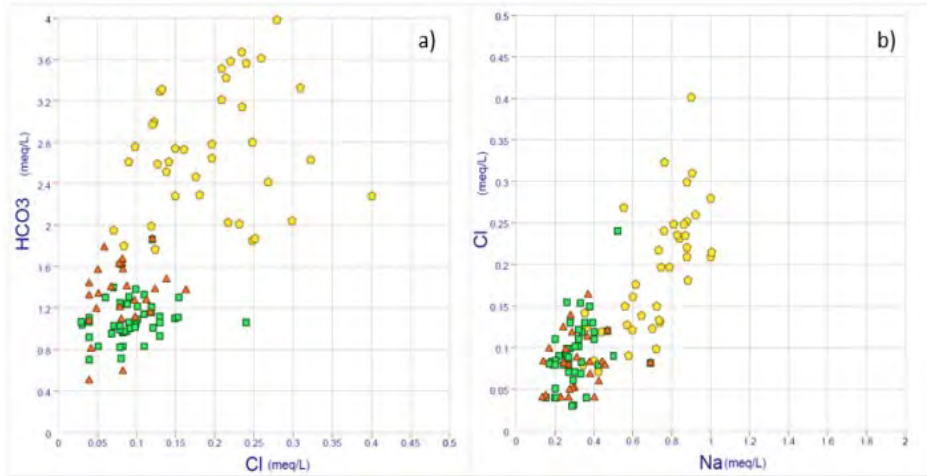


Figura 10. Gráficos binarios de concentraciones en a) Cl/HCO₃ y b) Na/Cl. En triángulos naranjos se representa Rio Pedernal en Tejada, en cuadrados verdes Rio Sobrante en Piñadero, en pentágonos amarillos Rio Petorca en Petorca.

La baja correlación del ion NO₃⁻ con la gran mayoría de los elementos analizados en la matriz de Pearson, sugiere que la fuente de origen de esta sustancia no sería el medio geológico, más bien podría estar relacionada al uso de fertilizantes que contienen nitrógeno en su composición y a la descomposición de materia orgánica proveniente de aguas residuales domésticas tanto por fosas sépticas como por fugas en el sistema de alcantarillado y/o plantas de tratamiento (Custodio & Llamas, 1996, v2).

El análisis de los diagramas de Stiff en los tres sectores del acuífero (**Figura 11**) muestra que los afluentes Pedernal y Sobrante tienen menores concentraciones de iones mayoritarios respecto a la estación Petorca, en la cual, los valores especialmente de calcio y bicarbonatos presentan un valor considerable, esto puede ser asociado a un mayor tiempo de circulación de las aguas en contacto con las

litologías de los depósitos fluvio-aluviales, sin embargo, debido a su alta concentración es posible que también haya influencia de factores antrópicos que generan el aumento de dichas concentraciones pudiendo tener relación a la actividad agrícola que aporta sales a través del uso de pesticidas y fertilizantes, y a descomposición de materia orgánica proveniente de aguas residuales tanto de vertederos como domésticas (FCIHS, 2009).

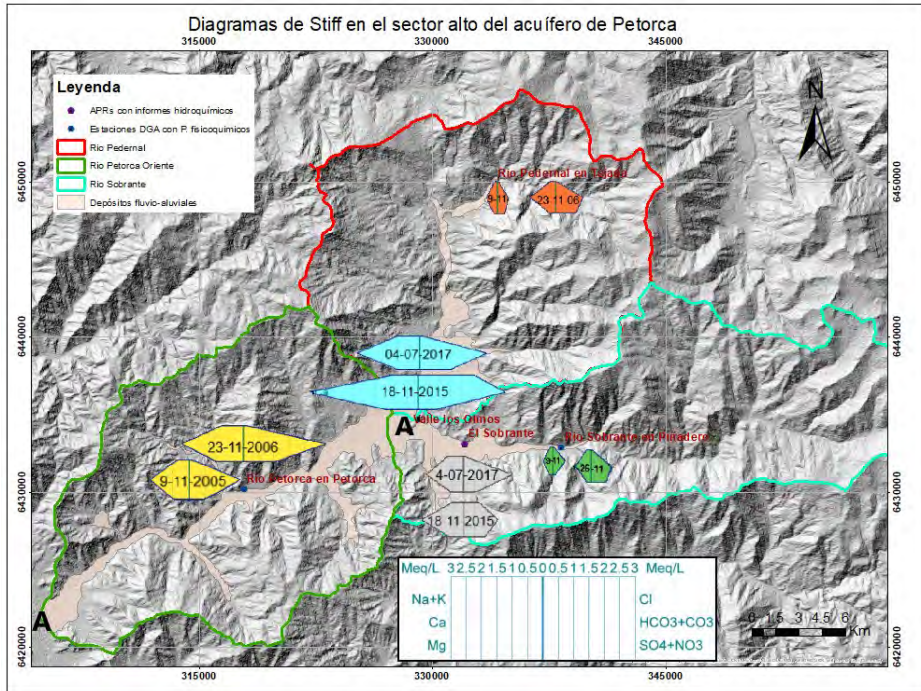


Figura 11. Distribuciones de los diagramas de Stiff en el sector alto del acuífero de Petorca. Las fechas de los diagramas verdes y naranja corresponden al 9-11-2005 y 26-11-2006. Las letras A-A' indican la traza del modelo conceptual.

Modelo Conceptual

El modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero (**Figura 12**) considera los siguientes factores:

- Entradas: infiltración por precipitaciones y por retorno de riego, recarga por pérdida en redes de suministro y alcantarillado. Aunque se observó una vertiente proveniente de una ladera en el sector de Hierro Viejo esta no será considerada debido a que no ha podido ser cuantificada.
- Salidas: extracciones por bombeo y salida por el límite oeste de la zona de estudio.

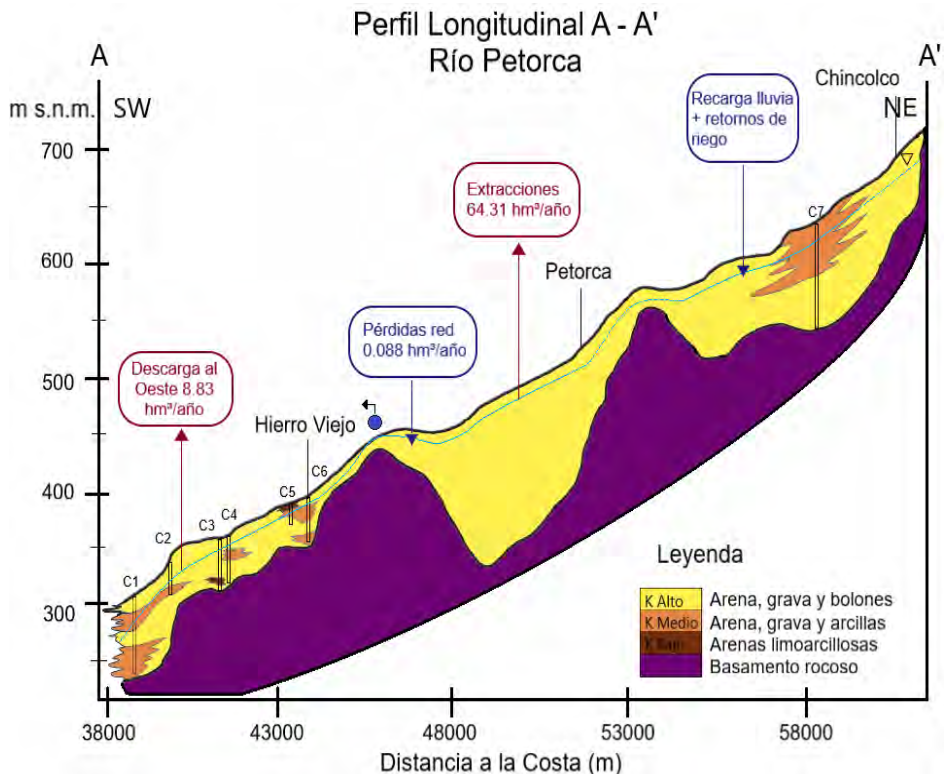


Figura 12. Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del acuífero fluvio-aluvial de Petorca entre Chincolco y Manuel Montt. Periodo considerado: enero 2010 – diciembre 2018.

El modelo conceptual se realizó hasta la localidad de Chincolco debido a que para los sectores de Pedernal y Sobrante los datos son insuficientes.

En cuanto a las unidades hidrogeológicas se pudo diferenciar principalmente tres tipos de composiciones: la más abundante, con tamaños muy variados, está conformada por arenas, gravas y bolones con una conductividad hidráulica de entre 1 a 100 [m/d] y una porosidad eficaz media de un 25%. La segunda unidad estaría conformada por arenas, gravas y arcillas con una conductividad hidráulica entre 0.01 a 1 [m/d], debido principalmente al contenido de arcillas este tipo de depósitos son considerados como acuíferos. La última unidad corresponde a lentes de arenas limo-arcillosas con conductividades hidráulicas entre 10^{-2} a 10^{-4} [m/d] siendo considerados acuitardos, sectores de muy baja permeabilidad que forman barreras hidráulicas.

La geometría del acuífero presenta una gran variabilidad en el espesor de los depósitos fluvio-aluviales, alcanzando su máximo entre los sectores de La Ñipa y Petorca con 135 metros, el mínimo se ubica entre los sectores de Hierro Viejo y La Ñipa con aproximadamente 1 metro de espesor (afloramiento de agua). Además, de este a oeste el espesor tiende a aumentar para luego disminuir drásticamente en dos oportunidades. Acudiendo a la geología, se advierte que la zona de estudio está controlada por estructuras regionales de rumbo NS a NW (**Figura 13**). Al este se ubica el sistema de fallas Quebrada Castro con un rumbo de N22°W y que comprende una serie de fallas subparalelas dextrales con menor componente transpresivo, donde el bloque occidental descende (Camus et al, 1991); al oeste se encuentra un sistema de fallas subparalelas, con orientación promedio N20°W y sin información cinemática (Vicencio V. et al., 2017), cabe destacar también que entre las localidades de La Ñipa y Hierro Viejo es posible notar como el lecho del río se encuentra dislocado (**Figura 5**) un indicador clave de control estructural. Los sectores por donde cruzan estas fallas son justamente donde los espesores de los depósitos fluvio-aluviales son menores, es más, al oeste del sistema de fallas Quebrada Castro es donde se presenta el mayor de los espesores y justamente, según Camus (1991), este bloque descende.

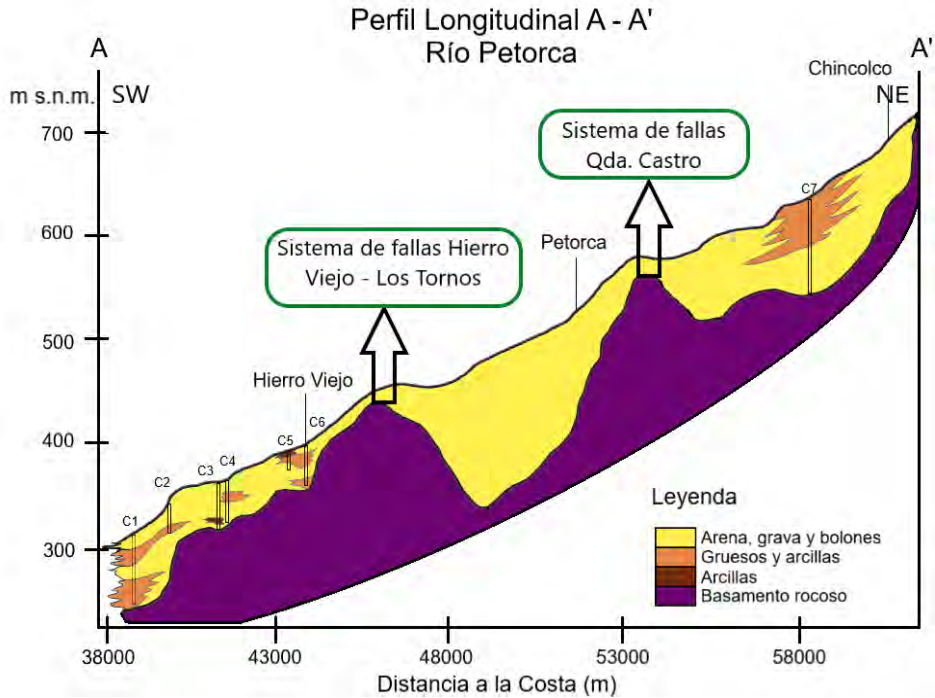


Figura 13. Perfil del acuífero con la ubicación de las estructuras que controlarían su geometría.

Dichas estructuras podrían estar relacionadas a sistemas de fallas direccionales con componentes de cizalla simple. De esta manera podría explicarse el relieve que presenta el basamento rocoso, con sus drásticos cambios de pendiente y de profundidad, así como también, la curvatura que presenta el río. Sin embargo, para afirmar esta proposición es necesario realizar un levantamiento de información estructural detallado.

Balance Hídrico 2010 – 2018

Los datos de las estaciones de aforo más próximas a la entrada y salida del acuífero en la zona de estudio corresponden al año 2017, estos muestran que el caudal promedio de entrada (entre los sectores de Sobrante y Pedernales) es muy similar al de salida (sector Hierro Viejo), de aproximadamente 0.73 m³/s lo que implica que las pérdidas y ganancias del río se equilibran a lo largo de su recorrido por la zona en estudio.

El balance hidrometeorológico (**Tabla 1**) entrega como promedio anual de las recargas un valor de 38.39 hm³/año. Mientras que la entrada por pérdidas por abastecimiento y alcantarillado tiene como resultado total 0.088 hm³/año.

	Precipitación + Riego	ETP Penman	Recarga	Recarga
Año	mm/año	mm/año	mm/año	hm ³ /año
2010	540.86	876.44	0.14	0.14
2011	427.64	887.59	33.43	34.05
2012	328.32	924.42	0.00	0.00
2013	278.70	915.70	9.66	9.84
2014	250.17	908.54	24.62	25.08
2015	347.78	918.32	109.75	111.79
2016	479.92	922.25	96.39	98.18
2017	333.44	974.67	65.20	66.41
2018	181.75	970.72	0.00	0.00
Promedio	352.06	922.07	37.69	38.39

Tabla 2. Resultados obtenidos del balance meteorológico realizado en el programa EASY BAL.

Las extracciones promedio correspondientes a los derechos de agua otorgados se estimaron en 64.31 hm³/año. Mientras que, en el límite oeste de la zona de estudio, se considera una salida de 8.83 hm³/año.

Finalmente, se calcula el balance hídrico suponiendo una relación río-acuífero nula obteniéndose el siguiente cálculo:

Entradas – Salidas = Variación de almacenamiento

$$38.48 \text{ hm}^3/\text{a} - 73.14 \text{ hm}^3/\text{a} = -34.66 \text{ hm}^3/\text{a}.$$

En estudios anteriores los balances se realizan desde la cabecera hasta la desembocadura en el mar, en GCF Ingenieros Ltda. (2013) el balance realizado entre los años 1950 - 2010 entrega entradas de 683 l/s (21.46 hm³/año) y salidas de 684 l/s (21.49 hm³/año) mientras que el realizado entre 2000 – 2004 tiene entradas de 571.7 l/s (18.05 hm³/año) y 570.8 l/s (18.02 hm³/año) de salida. Por otro lado, el más similar a la presente investigación, Álvarez *et al.* (2015) realiza un balance entre los años 1981- 2010 estimando una entrada de 56,510,604 MMm³ (56.51 hm³/año) y una salida de 70,810,334 MMm³ (70.81 hm³/año).

Al comparar los resultados de los distintos balances hídricos se advierte un comportamiento similar, siendo las salidas mayores que las entradas. Sin embargo, en el presente, la variación de almacenamiento es mucho mayor que en los casos anteriores. Esto puede deberse a que la cantidad de derechos de agua inscritos no implica que estos sean extraídos efectivamente (así como también hay extracción ilegal), lo que genera que el valor de las extracciones sea muy difícil de calcular.

CONCLUSIONES

- La geometría del acuífero, al igual que la geología de la zona están controlados principalmente por estructuras tipo fallas de carácter regional con rumbo preferencial NS a NW.
- El acuífero de Petorca se interpreta como un acuífero libre con tres unidades hidrogeológicas asociadas a los depósitos fluvio-aluviales diferenciándose entre sí por el contenido de arcillas presentes en cada una.
- La piezometría del sector tiene pendiente de 1 y 2% y el agua se encuentra en general a unos 6 m de profundidad hasta el sector de Hierro Viejo, luego se llega los casi 30 m en el sector de Pedegua, esto implica una fuerte y progresiva profundización del nivel piezométrico.

- Las aguas del acuífero son bicarbonatadas cálcicas en el sector de Sobrante, bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas en el área de Pedernal y bicarbonatadas calcio magnésicas en el sector de Petorca. Sus diferentes composiciones tienen relación con el tipo de recarga que recibe y de las actividades que priman en cada sector.
- La calidad de las aguas se ve afectada tanto por un factor natural (geología), como por factores antrópicos como ocurre con el aumento de nitratos y sulfatos observado en Petorca Oriente.
- De acuerdo con las variaciones hidroquímicas observadas, si continúa disminuyendo el volumen almacenado también empeorará la calidad de las aguas, lo que podría llegar a originar aguas no aptas para el consumo humano.
- La disponibilidad de agua se ve afectada tanto por factores naturales como el cambio climático y el nivel de fracturamiento de las rocas, como por factores antrópicos como el cambio de uso de suelo y la sobreexplotación de las aguas subterráneas, siendo principalmente utilizadas en el área agrícola. De continuar el mismo régimen extractivista y de no cambiar las prioridades de los usos del agua, es muy probable que habitar el sector se vuelva insostenible y se destruya por completo el ecosistema original.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, P., Reyes, H., Cortés, M., & Córdova, A. M. (2015). *Lineamientos estratégicos para la sustentabilidad hídrica de la cuenca de Petorca*. Universidad de La Serena.

Alvarez-Garreton, C. M.-B. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846.

ArcGIS Desktop 10.8.1 Educational Academic Departmental Medium Single Use Term License. Tools: ArcGIS Desktop Advanced, ArcGIS 3D Analyst for Pro, ArcGIS Geostatistical Analyst for Pro, ArcGIS Network Analyst for Pro, ArcGIS Publisher for Pro, ArcGIS Spatial Analyst for Pro, ArcGIS Geostatistical Analyst Desktop, ArcGIS Network Analyst for Desktop, ArcGIS Spatial Analyst for Desktop, ArcGIS 3D Analyst for Desktop.

Cade-Idepe Consultores. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Vol. 5. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago.

- Camus, F., Boric, R., Skewes, M., Castelli, C., Reichhard, E., & Mestre, A. (1991). Geologic, structural, and fluid inclusion studies of El Bronce epithermal vein system, Petorca, central Chile. *Economic Geology* 86(6), 1317-1345.
- Castillo, F. (2008). *Necesidad de agua en las plantaciones de naranjo en Andalucía*. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Consejería de Agricultura y Pesca.
- Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2017). *Catastro Frutícola, Región de Valparaíso*.
- Cica; Binnie & Partners; Hunting Technical Service Ltda. (1979). *Estudio integral de riego de los valles de Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca*. Santiago: Comisión de riego.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). Hidrología Subterránea, Vol. 1. Barcelona: Omega.
- Departamento de Recursos Hídricos; Universidad de Concepción. (2016). *Estudio básico diagnóstico para desarrollar plan de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca*. Concepción.
- DGA. (2018). *Seguimiento de la calidad del agua subterránea - Pozos APR región de Valparaíso*. Santiago.
- ENVI 5.6.1 ENVI Mini Lab Concurrent Process.
- Fagundo, J. M. (2010). *Patrones hidrogeoquímicos y origen de la composición química de aguas subterráneas que drenan carbonatos*. Ciudad de la Habana.
- FCIHS, C. d. (2009). *Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología subterránea*. Publicado por Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
- GCF Ingenieros Ltda. (2013). *Mejoramiento de agua subterránea para riego Ligua y Petorca*. Santiago.
- GCF Ingenieros Ltda. (2011). *Diagnóstico de los recursos subterráneos en el sistema hídrico Ligua y Petorca*. Comisión Nacional de Riego.
- Girardi, C., & Recio, J. (2015). *Estudio Hidrogeológico del Baix Ter*. (Baix Empordá, Girona. doi: <https://doi.org/15004>
- González-Abraham, Antalia, Fagundo-Castillo, Juan Reynerio, Carrillo-Rivera, José Joel, & Rodríguez-Estrella, Ricardo. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcánicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 319-333. Recuperado en 17 de noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222012000300005&lng=es&tlng=es.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2007). *VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal*.
- Instituto Nacional de Estadísticas, (2017). *Encuesta de Superficie Sembrada de Cultivos Anuales*.
- Lobos G., V. A. (2017). *Manejo hídrico en frutales bajo condiciones edafoclimáticas de Limarí y Choapa*. INIA.

Luebert, F. &. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones Geográficas*, 41-56.

Ovalle, M. J. (2012). *Estimación de la huella hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Limarí, región de Coquimbo, Chile*. Santiago de Chile.

Pérez, R. (2018). Patrimonio geológico de la comuna de Petorca (32°s – 32°24's): análisis de lugares de interés geológico y su contextualización en un modelo de evolución paleogeográfico. *Memoria para optar al título de geólogo*. Santiago: Universidad de Chile.

Richard G. Allen, L. S. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Simler, R. (2018). *Logiciel d'hydrochimie - Water Software Quality Hydrochemistry diagrams. Version 6.59*. France: Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2008). *Consumo de agua potable 2007- 2008*.

Vazquez-Suñe, E., & Serrano-Juan, A. (2013). *EASY_BAL v10.7*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Vélez, M. V. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Medellín, Colombia: Segunda edición, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

Vicencio V., D. I. (2017). *Informe Geológico de la Comuna de Petorca. Primera etapa de Exploración de la Geodiversidad de la Comuna de Petorca*. Programa de Prácticas Profesionales. Geoparque Valle de Petorca.

ANEXOS

Estación	Parámetro medido	UTM Norte	UTM Este	Primer dato	Último dato
Agua Potable Hierro Viejo	Nivel estático	6426647	310475	30-08-1995	23-05-2019
Agua Potable Polcura	Nivel estático	6432125	323775	30-08-1995	01-04-2019
Agua Potable Valle Los Olmos	Nivel estático	6433979	328524	14-12-1995	07-03-2014
Escuela Chalaco	Nivel estático	6437391	329906	15-10-1996	10-09-2009
Los Olmos-Chalaco	Nivel estático	6436276	329181	30-08-1995	01-04-2019
Sociedad Agrícola Bellavista	Nivel estático	6429798	319024	30-08-1995	08-10-2018
Rio Pedernal en Tejada	Hidroquímica - caudal	334042	6449855	22-02-1984	23-11-2006
Rio Sobrante en Piñadero	Hidroquímica - caudal	338253	6432848	22-02-1984	22-11-2006
Rio Petorca en Petorca	Hidroquímica - caudal	317861	6430159	03-12-1981	23-11-2006
Chalaco	Precipitación	6438332	331485	01-01-2009	30-11-2018
Sobrante en Hacienda	Precipitación	6432712	330879	01-01-2009	31-12-2018
Trapiche	Precipitación	6432849	336274	01-01-2009	30-11-2018
Hierro Viejo	Precipitación	6426657	313833	01-01-2009	31-12-2018
Pedernal en Hacienda	Precipitación	6447868	330256	01-01-2009	31-12-2018
Petorca en Peñon	Precipitación	6426939	312690	01-01-2009	31-12-2018
Sobrante en Piñadero	Precipitación	6432848	338253	01-12-2012	31-12-2018
Chincolco iceo Agrícola	Temperatura	70831666	3222499	01-01-2017	31-12-2018
Salamanca	Temperatura	70714	318856	01-01-2017	31-12-2018

Anexo 1. Ubicación e información obtenida desde diferentes estaciones de medición.

	TDS	TC	pH	c25°C	cCAL	cCa%	Bal-c	Bal-s	relat	Calor	Anon	Co	Mg	Na	K	Fer	Fe(II)	Mn	Sr	Li+	Al	NH4	HCO3	HCO3	CO3	Cl	SO4	PO4	NO3	NO2	HS-	S2-	OH-	
TDS	1	0.44	0.34	0	1.00	0	0.97	-0.21	0.29	0	1.00	1.00	0.98	0.95	0.92	0.43	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.97	0	0.73	0.90	0	0.04	0	0	0	0.11	
TC	0.44	1	0.19	0	0.43	0	0.47	-0.04	0.11	0	0.43	0.43	0.42	0.41	0.44	0.17	0	0	0	0	0	0	-0.18	0.47	0	0.26	0.33	0	0.02	0	0	0	0.93	
pH	0.34	0.19	1	0	0.35	0	0.34	-0.03	0.10	0	0.34	0.34	0.36	0.28	0.28	0.19	0	0	0	0	0	0	-0.68	0.34	0	0.22	0.28	0	0.05	0	0	0	0.70	
c25°C	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
cCAL	1.00	0.43	0.35	0	1	0	0.95	-0.24	0.32	0	1.00	1.00	0.97	0.96	0.93	0.45	0	0	0	0	0	0	-0.25	0.96	0	0.75	0.92	0	0.03	0	0	0	0.12	
cCa%	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bal-c%	0.97	0.47	0.34	0	0.95	0	1	-0.33	0.39	0	0.97	0.96	0.96	0.91	0.88	0.42	0	0	0	0	0	0	-0.25	0.98	0	0.69	0.78	0	0.03	0	0	0	0.10	
Bal-s%	-0.21	-0.04	-0.03	0	-0.24	0	-0.33	1	-0.96	0	-0.28	-0.19	-0.27	-0.28	-0.27	-0.36	0	0	0	0	0	0	-0.01	-0.18	0	0.31	0.22	0	0.60	0	0	0	-0.01	
Balance	0.25	0.11	0.10	0	0.32	0	0.39	-0.96	1	0	0.36	0.27	0.34	0.36	0.35	0.36	0	0	0	0	0	0	-0.04	0.25	0	0.35	0.31	0	-0.59	0	0	0	0.95	
relate	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Calor	1.00	0.43	0.34	0	1.00	0	0.97	-0.28	0.36	0	2.67	0.99	0.98	0.96	0.93	0.46	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.96	0	0.76	0.91	0	0.00	0	0	0	0	0.11
Anon	1.00	0.43	0.34	0	1.00	0	0.96	-0.19	0.27	0	0.99	2.72	0.97	0.95	0.92	0.42	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.97	0	0.74	0.91	0	0.04	0	0	0	0	0.11
Co	0.98	0.42	0.36	0	0.97	0	0.96	-0.27	0.34	0	0.99	0.97	60.9%	0.88	0.84	0.37	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.96	0	0.67	0.87	0	0.00	0	0	0	0	0.15
Mg	0.95	0.41	0.28	0	0.96	0	0.91	-0.28	0.36	0	0.96	0.95	0.88	21.2%	0.93	0.47	0	0	0	0	0	0	-0.23	0.99	0	0.78	0.90	0	0.00	0	0	0	0	0.07
Na	0.92	0.44	0.28	0	0.93	0	0.88	-0.27	0.35	0	0.93	0.92	0.84	0.93	17.1%	0.52	0	0	0	0	0	0	-0.23	0.88	0	0.79	0.86	0	0.03	0	0	0	0	0.04
K	0.43	0.17	0.19	0	0.45	0	0.42	-0.36	0.36	0	0.46	0.42	0.37	0.47	0.52	0.8%	0	0	0	0	0	0	-0.15	0.37	0	0.63	0.41	0	-0.01	0	0	0	0	0.02
Fer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe(II)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe(III)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Li+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NH4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO3+	-0.26	-0.19	-0.68	0	-0.26	0	-0.25	-0.01	-0.04	0	-0.26	-0.26	-0.23	-0.23	-0.15	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	-0.26	0	-0.16	-0.22	0	-0.08	0	0	0	0	-0.19
HCO3	0.97	0.47	0.34	0	0.96	0	0.96	-0.19	0.25	0	0.96	0.97	0.96	0.89	0.88	0.37	0	0	0	0	0	0	-0.26	63.4%	0	0.66	0.78	0	0.04	0	0	0	0	0.09
CO3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cl	0.73	0.26	0.22	0	0.75	0	0.65	-0.31	0.35	0	0.75	0.74	0.67	0.78	0.79	0.63	0	0	0	0	0	0	-0.16	0.66	0	4.6%	0.71	0	-0.05	0	0	0	0	0.01
SO4	0.90	0.33	0.29	0	0.92	0	0.78	-0.22	0.31	0	0.91	0.91	0.87	0.90	0.86	0.41	0	0	0	0	0	0	-0.22	0.78	0	0.71	30.9%	0	-0.05	0	0	0	0	0.12
PO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO3	0.04	-0.02	0.05	0	0.03	0	-0.03	0.68	-0.59	0	0.00	0.04	0.00	0.00	-0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	-0.08	0.04	0	-0.05	-0.05	0	1.0%	0	0	0	-0.03	
NO2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HS-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
S2-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
OH-	0.11	0.03	0.70	0	0.12	0	0.10	-0.01	0.05	0	0.11	0.11	0.15	0.07	0.04	0.02	0	0	0	0	0	0	-0.19	0.09	0	0.01	0.12	0	-0.03	0	0	0	0	0.1%

Anexo 2. Matriz de correlación de Pearson correspondiente a los datos del presente trabajo.

LA AUTORA

Justinne Rybertt Goldammer es Geóloga de la Universidad Andrés Bello. Ha desarrollado sus estudios de pregrado en temáticas hidrogeológicas, específicamente en la cuenca del río Petorca. Cuenta con experiencia ligada al área académica en ramas de la geología como: Hidrogeología y Geología Estructural. Actualmente se desempeña como profesional en el Centro de Acción Climática de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso contribuyendo en la generación de planes de adaptación al cambio climático, además, forma parte del Laboratorio de Territorios Hidrosociales y Cambio Climático perteneciente a la misma universidad y al Laboratorio de Análisis Isotópicos de la Universidad Andrés Bello.


TESIS DE POSGRADO



Dinámica glaciar de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: el agua del futuro¹

Santa Cruz river basin's glacier dynamic: fresh water of future

Andrés Lo Vecchio Repetto  orcid.org/0000-0002-3606-9160

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo
 anlovechchio@ffyl.uncu.edu.ar

RESUMEN

La superficie glaciar más extensa de la República Argentina se encuentra en la cuenca del río Santa Cruz (CRS), Andes Patagónicos Australes. La CRS concentra el 35% de toda la cubierta glaciar nacional (incluidas las islas subantárticas), y el 52 % si solo se consideran los Andes. Sus 3023 km² están distribuidos en un millar de glaciares, aunque entre siete de ellos acumulan el ~80 % de esa área (Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino y Perito Moreno). Esos siete glaciares terminan en lagos proglaciares, lo cual estimula procesos de aceleración, fractura y desprendimiento de hielo glaciar (glaciares de desprendimiento). El objetivo de la tesis es determinar las relaciones multiescalares existentes entre la dinámica de los glaciares de desprendimiento de la CRS, los procesos naturales disparadores, y sus impactos en el espacio geográfico. Para tal fin se propone el análisis de las últimas dos décadas a través de diferentes plataformas satelitales e información temática disponible. En este trabajo, los indicadores glaciológicos analizados son los cambios de posición frontal y los eventos de fusión supraglacial. A efectos de síntesis, los resultados muestran una

¹ Síntesis de la Tesis Doctoral de Andrés Lo Vecchio Repetto, Doctorado en Geografía, F.F.y L., UNCuyo, 2020.

retracción acumulada de $19 \pm 0,3$ km durante todo el periodo de estudio, aunque con comportamientos individuales heterogéneos. Entre 1985 y 2017 el glaciar Upsala retrocedió 8287 ± 60 m, al mismo tiempo que glaciar Moreno avanzó 101 ± 60 m. El glaciar Spegazzini es otro glaciar que sostuvo su posición en ese periodo, inmediatamente al sur del glaciar Onelli que retrocedió 3069 ± 60 m. Lo anterior sugiere la multicausalidad de la dinámica glaciar y la inexistencia de un único forzante. En términos de eventos de fusión (2001-2016), la extensión ocupada por estos tiene una marcada estacionalidad, frecuentes durante los meses de verano incluso en las altas cumbres (>3000 m). Durante el periodo estival (octubre/abril) más del 50 % del área glaciar estuvo en fusión (con máximos del 75% en el verano del 2013). Por el contrario, durante la fase invernal se redujeron drásticamente e incluso se ausentaron en los meses de junio-julio. En términos de cuenca, los eventos de fusión comenzaron a aumentar a partir del 2010, con una tendencia positiva a favor de su expansión. Las consecuencias de la dinámica glaciar han jugado un rol clave en las posibilidades de configuración de espacios humanizados. Esos enclaves están estructurados en función de esa dinámica, ya sea por la exposición a amenazas de origen glaciar o bien por significar la principal fuente de divisas para la cuenca: el turismo glaciar.

PALABRAS CLAVE: Glaciares y sociedad, cuenca del río Santa Cruz, Dinámica glacial histórica.

ABSTRACT

The largest glacier area in Argentina is located in the Santa Cruz River Basin (CRS), Southern Patagonian Andes. The CRS concentrates 35% of the entire national glacier cover (including the sub-Antarctic islands), and 52% if only the Andes are considered. Its 3023 km² are distributed in a thousand glaciers, although between seven of them accumulate ~80% of that area (Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino, and Perito Moreno). These seven glaciers end in proglacial lakes, which stimulate processes of acceleration, fracture, and detachment of glacial ice (detachment glaciers). The thesis aims to determine the multiscale relationships between the dynamics of the detachment glaciers of the CRS, the natural triggering processes, and their impacts on the geographic space. To this end, the analysis of the last two decades is proposed through different satellite platforms and the thematic information available. In this work, the glaciological indicators analyzed are frontal position changes and supraglacial melting events. For synthesis purposes, the results show a cumulative retraction of 19 ± 0.3 km during the whole study period, although with heterogeneous individual behaviors. Between 1985 and 2017 the Upsala glacier retreated 8287 ± 60 m, at the same time Moreno glacier advanced 101 ± 60 m. Spegazzini glacier is another glacier that sustained its position in that period, immediately south of Onelli glacier which retreated 3069 ± 60 m. The above suggests the multicausal of glacial dynamics and the inexistence of a single forcer. In terms of melting events (2001-2016), the extent occupied by these has a marked seasonality, frequent during the summer months even at high summits (>3000 m). During the

warm period (October/April) more than 50% of the glacier area was melting (with maximums of 75% in the summer of 2013). In contrast, in the cold phase, they were drastically reduced and even absent in the months of June-July. In CRS, melt events began to increase from 2010, with a positive trend. The consequences of glacial dynamics have played a key role in the possibilities for the configuration of humanized spaces. These places are structured according to these dynamics, either because of exposure to glacial hazards or because they represent the main source of foreign exchange for the basin: glacier tourism.

KEYWORDS: Glaciers and society, Santa Cruz river basin, Historical glacial dynamics.

INTRODUCCIÓN

Glaciares y sociedad, una historia en común

El 68% del agua dulce disponible en la Tierra se encuentra almacenada en los glaciares. En muchas de las regiones áridas y semiáridas del planeta el agua de ablación nivo-glaciar es la única fuente para consumo humano, agricultura, industria, para otros organismos vivos y el sostén de ecosistemas (Meier y Roots, 1982). Además de una fuente y reserva de agua dulce, los ambientes glaciares representan una amenaza para los poblados localizados aguas abajo. Durante el siglo XX numerosos desastres tuvieron lugar en distintos sitios del mundo (Williams y Ferrigno, 2012), y en Sudamérica los casos del GLOF (*Glacial Lake Outburst Flow*) del Plomo y las desastrosas consecuencias para la ciudad de Mendoza (1934); y el lahar del Nevado del Ruiz que sepultó la ciudad de Armero (Colombia), aún hoy son recordados.

Hay ~25000 km² cubiertos por glaciares en Sudamérica (Ohmura, 2009), de los cuales la República Argentina tiene jurisdicción sobre el ~38 % (8484 Km²), representada en más de 16000 cuerpos localizados en la cordillera de los Andes y las islas del Atlántico Sur (Inventario Nacional de Glaciares, 2018). Considerando únicamente el área glaciar en los Andes (5769 km²), los Andes Patagónicos del Sur argentino (APS) concentran el 60% de esta. En los APS hay una tendencia al gigantismo glaciar, a tal punto que solo el glaciar Viedma (~1009 km²) representa el 17 % del total de la superficie glaciar en los Andes argentinos.

En los APS, tiene origen el río Santa Cruz, que es el segundo más caudaloso de la República Argentina (después del río Negro) si se considera a aquellos que tienen origen y fin en territorio nacional. Allí, al igual que en todos los Andes Áridos y zonas áridas de la Patagonia extrandina los recursos hídricos son los ejes estructurantes de la expansión humana sobre el territorio (**Figura 1**).

La cuenca del río Santa Cruz (CRS) es un sistema ambiental complejo donde distintos procesos naturales y antrópicos se superponen e interactúan a diversas escalas espacio-temporales. El régimen hídrico del río Santa Cruz es ultraglaciar (Vich, 1996), lo cual supone una dependencia absoluta de la ablación glaciar en sus caudales. El 85 % de la superficie glaciar de la CRS está contenida en siete glaciares (los más extensos del país): Viedma (~1009 km²), Upsala (~853 km²), Onelli (~67 km²), Spegazzini (~169 km²), Mayo (~40 km²), Ameghino (~93 km²) y Perito Moreno (~262 km²), quienes descienden del Campo de Hielo Patagónico Sur (White y Copland, 2015). Estos, junto a otros 1079 glaciares constituyen el subsistema criosférico de la CRS (**Figura 2**). Los siete glaciares mencionados terminan en el sistema lacustre Viedma-Argentino, dos lagos proglaciares de más de 1000 km² cada uno y profundidades máximas de ~ 600 m (Sugiyama et al., 2016). Las aguas del Viedma son vertidas al Argentino, a través del río La Leona, en el extremo norte del cuerpo principal. Algunos kilómetros al sur, tiene origen el río Santa Cruz, justo en extremo oriental del lago Argentino (**Figura 2**).

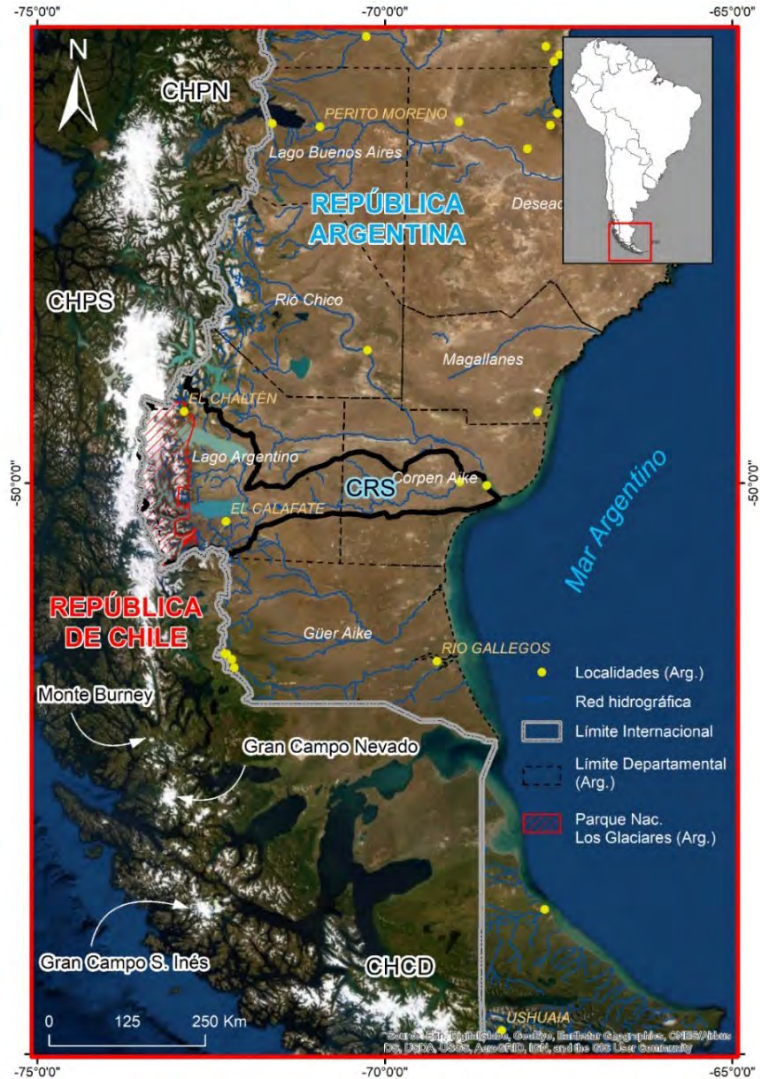


Figura 1. Sitio y posición de la Cuenca del Río Santa Cruz. Además, Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN), Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) y Campo de Hielo de la Cordillera Darwin (CHCD). Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

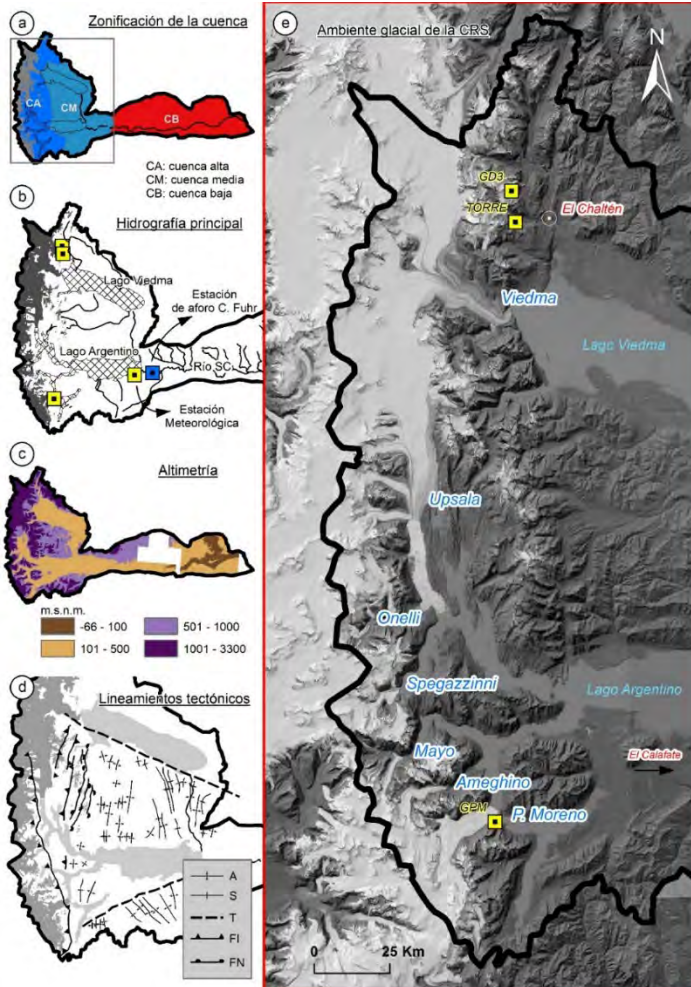


Figura 2. Cuenca del río Santa Cruz y sus diversos aspectos geográficos. a) zonificación espacial de la CRS en cuenca alta, media y baja. b) principales aspectos de la hidrografía de la cuenca y distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en la Figura 2.5. c) Distribución espacial de la topografía: Modelo Digital de Elevación ALOS-PALSAR de 12,5 m de resolución espacial. d) Lineamientos tectónicos de la CRS, A= anticlinal; S= sinclinal; FI= falla inversa; FN= falla normal y T= falla transformante extraídos de Ghiglione et al., (2009). e) Zoom al área englazada de la CRS. Imagen de fondo: LANDSAT 5 del 20-02-2011. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

Los glaciares de desprendimiento reciben ese nombre debido a su propiedad de liberar témpanos desde su frente como consecuencia de la fractura y ruptura del hielo glaciar. Aunque existen glaciares de desprendimiento “en seco”, usualmente ese término es conferido a aquellos que terminan en cuerpos de agua. En el caso de los glaciares de desprendimiento de la CRS, el fracturamiento y desprendimiento de hielo es consecuencia de las tensiones soportadas por la interacción con los lagos y lagunas proglaciares. El origen de esas tensiones es multicausal y pueden encontrarse en la aceleración del flujo glaciar, en la termo-erosión localizada en la interfaz glaciar-lago-atmosfera (línea de Notch) y por el efecto de flotación en aquellos casos que se supera el espesor crítico de flotación.

En la CRS, el ambiente criosférico ha acusado importantes cambios en los últimos treinta años, con fases de mayor intensidad durante la primera década del siglo XXI. En ese contexto, la tesis doctoral **“Dinámica glaciar de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: estudio y análisis multiescalar mediante el uso de geotecnologías”** (Lo Vecchio, 2020) propone reconstruir, analizar y cuantificar la dinámica glaciar en la CRS a través de indicadores glaciológicos, explorar sus posibles causas, y evaluar sus impactos sobre la organización del espacio.

En ese estudio, los indicadores glaciológicos son la fluctuación frontal (1985-2017), los eventos de fusión supraglacial (2001-2016), y las velocidades superficiales intraanuales (2015-2017). Por su parte, las variables investigadas como posibles causantes de la dinámica glaciar son categorizadas entre aquellas que tienen un área de influencia local y regional. En ese sentido, la sismicidad, el vulcanismo y los patrones de circulación atmosférica a gran escala SAM y ENSO son de alcance regional; mientras que la variación del nivel y las temperaturas del lago Argentino, la temperatura superficial glaciar y la litología del lecho glaciar son de alcance local. Los impactos de la dinámica glaciar son analizados desde las posibilidades y las amenazas naturales derivadas de la propia dinámica ambiental.

En efecto, la presente reseña de la tesis doctoral mencionada propone una síntesis de la historia reciente (últimas 3 décadas) de los glaciares de descarga en la CRS, sus posibles causas e impactos en la organización del territorio. A tal fin, los indicadores glaciológicos aquí presentados son aquellos referidos a la dinámica glaciar a largo plazo: cambios de posición frontal y eventos de fusión supraglacial.

Fluctuación frontal (1985-2017)

Los cambios de posición frontal de los glaciares de desprendimiento resultan del balance entre la tasa de desprendimiento ocurrida en el frente glaciar [ma^{-1}] y la velocidad del glaciar en la zona terminal [ma^{-1}] (Cuffey y Paterson, 2010). La reconstrucción de la fluctuación frontal histórica se enmarca en lo que Jansson (2003) denominaron estudios de periodo largo (*long-term*), focalizado en cambios anuales, decadales e incluso centurias. Esto supone que cambios mensuales y estacionales (periodo medio – *middle-term*), o menores (periodo corto – *short-term*), son omitidos. A tal fin, los glaciares analizados son Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino y Perito Moreno.

Considerando la posición actual de los frentes glaciares respecto del año 1985, cinco de ellos retrocedieron (Upsala, Viedma, Onelli, Mayo y Ameghino) (**Figuras 3, 4, 5, 6 y 7**) uno mantuvo su posición (Spegazzini) (**Figura 8**) y uno avanzó 100 ± 60 m (Perito Moreno) (**Figura 9**).

El retroceso acumulado más importante ocurrió en Upsala con 8287 ± 60 m, quien casi duplicó a la retracción experimentada por el segundo que más lo hizo, el glaciar Onelli 4518 ± 60 m ($-122 \pm 2 \text{ ma}^{-1}$). El glaciar Mayo fue el que menos retrocedió, -450 m, notablemente inferior al Upsala, Onelli e incluso al Viedma y Ameghino (-3069 ± 60 m y -2884 ± 60 m, respectivamente).

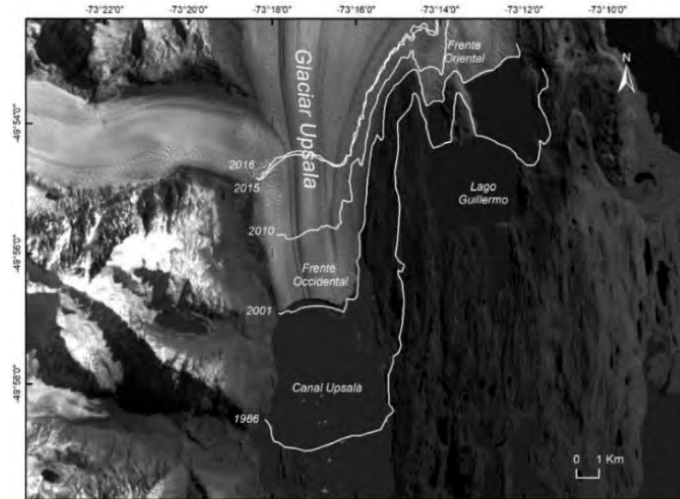


Figura 3. Glaciar Upsala. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 14-08-2002. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

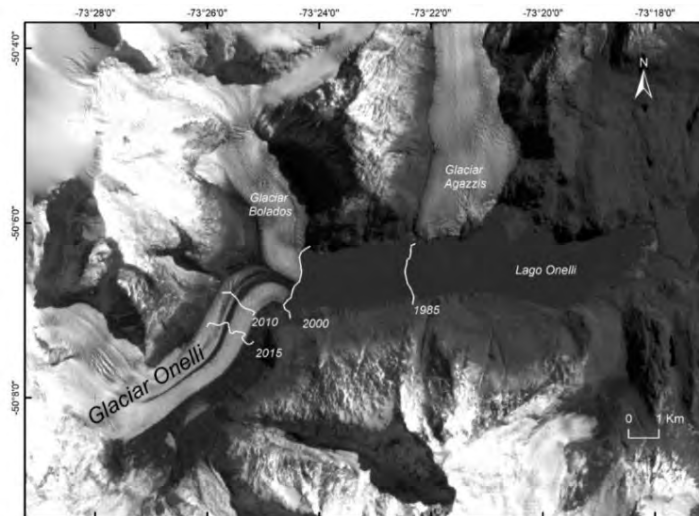


Figura 4. Glaciar Onelli. Imagen de base: LANDAST 8, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

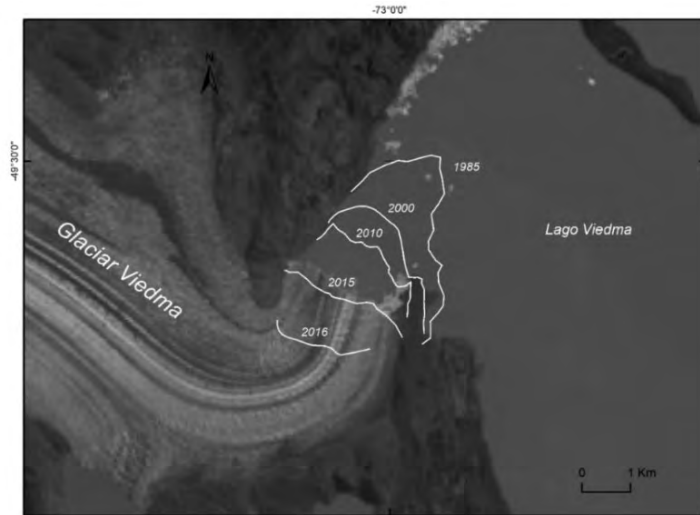


Figura 5. Glaciar Viedma. Imagen de base: LANDAST 8, correspondiente al 14-01-2014. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

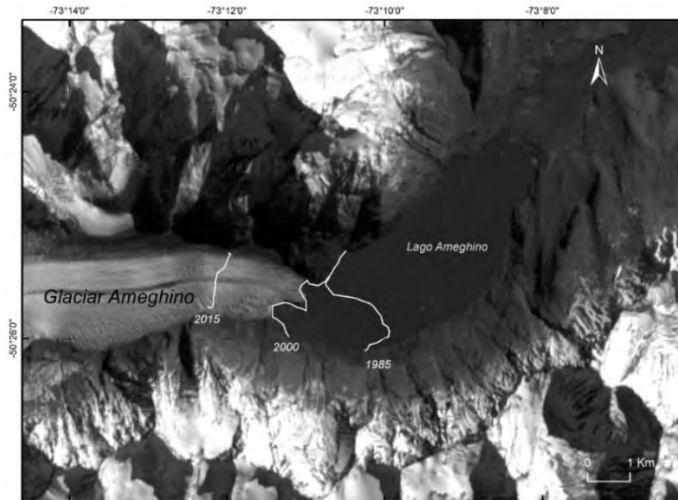


Figura 6. Glaciar Ameghino. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

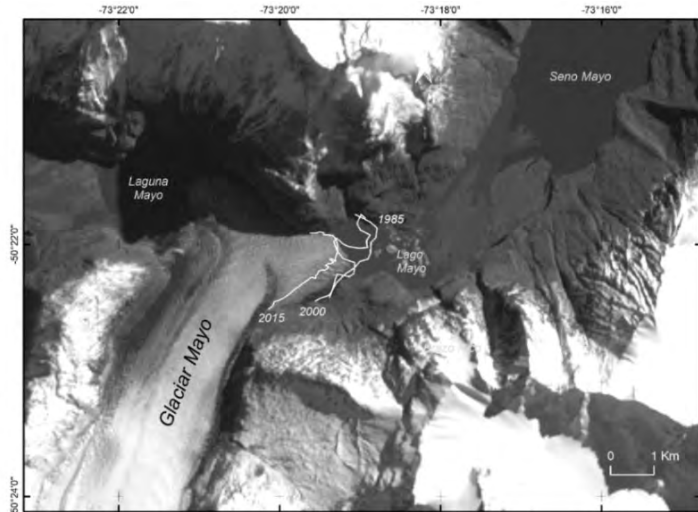


Figura 7. Glaciar Mayo. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).



Figura 8. Glaciar Spegazzini. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

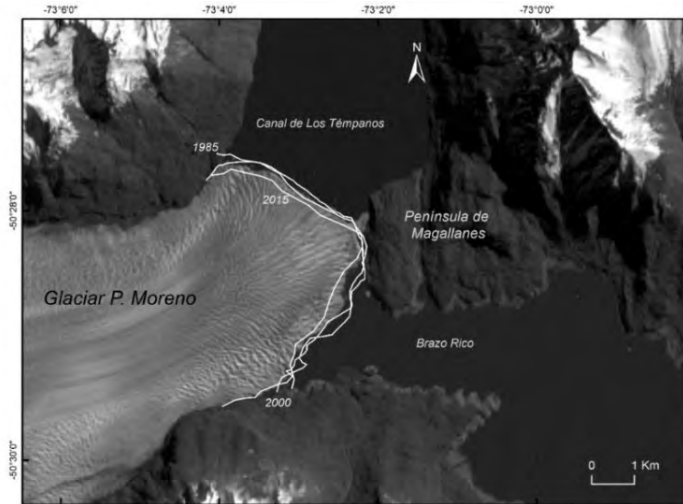


Figura 9. Glaciar Perito Moreno. Imagen de base: LANDAST 7, correspondiente al 20-03-2001. En líneas blancas están indicadas las posiciones frontales para distintos años. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

El acumulado de todo el periodo indica un retroceso de $19,2 \pm 0,3$ km, traducido en una pérdida de $128 \pm 6,4$ km² de área glacial (-4 km²a⁻¹; $-0,13$ %a⁻¹). La velocidad de retroceso de un mismo glaciar fue variable en el tiempo. Los retrocesos más veloces ocurrieron entre los años 2005 y 2011 (-748 ± 10 ma⁻¹), año a partir del cual se desaceleró, e incluso se produjeron avances en el glaciar Mayo (264 ± 60 m). Solo el glaciar Viedma intensificó su retroceso a partir del 2011 (**Figura 10**), la mayor retracción de los últimos 40 años (-233 ma⁻¹).

Entre las posibles causas de los cambios de posición frontal, se destaca la ausencia de alguna cuenca con control o impacto sobre todos los glaciares analizados. Por el contrario, se evidenció las particularidades del sitio de cada cuenca glaciar en el marco de un sistema ambiental mayor como es la CRS. Entre las causas de alcance regional se detectó que la oscilación norte-sur de los vientos del oeste (SAM index) acompañó la marcha de la tasa de cambio de la posición frontal [md⁻¹] de los glaciares Perito Moreno ($r=-0,89$) y Upsala ($r=-0,76$). El desplazamiento hacia el norte (a la latitud del CHPS y la CRS) de los vientos del oeste se traduce en un aumento de las precipitaciones (Garreaud 2009; Garreaud et al. 2009), y en glaciares como los

mencionados sugiere desacelerar el retroceso o incluso favorecer el avance (Perito Moreno). En cuanto a la sismicidad, no se hallaron evidencias que vinculen el retroceso glaciar durante el periodo 1985-2017 con la mayor o menor ocurrencia de eventos sísmicos. Sin embargo, debe reconocerse el potencial de un evento sísmico a corto plazo sobre la fluctuación frontal, desatando instantáneamente eventos masivos de desprendimiento por la oscilación del nivel lacustre y la fractura y ruptura del hielo. De hecho, en la región se evidenció una actividad sísmica moderada (entre el triple punto de Aysén y el cabo de Hornos), caracterizada por la detección de 461 eventos sísmicos (entre 1930 y 2018) con una magnitud promedio de 5 Mw. En la región existe una fuerte relación glaciovolcánica, aunque poco estudiada.

Mediante los registros de (Adaros, 2003) se detectó un enjambre sísmico superficial en las adyacencias del volcán Reclus, próximo a la CRS. A pesar de la ausencia de eventos eruptivos en el periodo de estudio, los antecedentes indican que un evento eruptivo podría reconfigurar el escenario glaciológico de la región (Martinic, 2008).

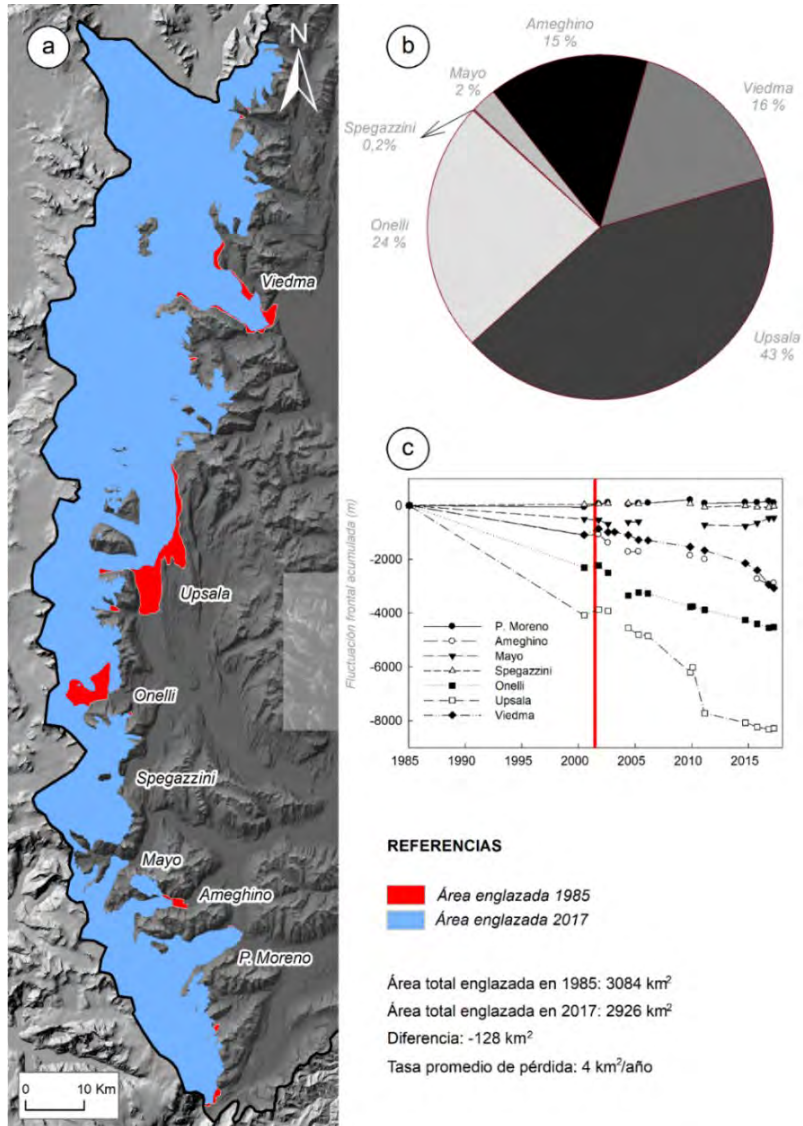


Figura 10. Síntesis de la fluctuación frontal de la CRS. a) Cambio de área entre los años 1985 y 2017. b) Porcentaje de participación por glaciar respecto de la fluctuación frontal total registrada entre los años 1985 y 2017 (-19,2 km). c) Fluctuación frontal acumulada por glaciar entre 1985 y 2017. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

Entre los posibles factores locales dinamizadores de la cubierta glaciar, las variaciones del nivel del lago Argentino fueron determinantes en los cambios de posición frontal de los glaciares Upsala ($r=-0,98$) y Perito Moreno ($r=-0,86$). Cambios en el orden de los centímetros pueden desencadenar retrocesos de hasta $\sim 3 \text{ md}^{-1}$ en el glaciar Upsala. Los glaciares Viedma, Onelli, Mayo y Ameghino estuvieron exceptuados de este análisis, todos por terminar en lagos con niveles lacustres desacoplados respecto del lago Argentino (lago Viedma, Onelli, Mayo y Ameghino, respectivamente) de los cuales no se tiene registro. Una última propiedad del ambiente glaciar fue hallada con un importante potencial, la litología del lecho glaciar. A través de una exploración de los afloramientos rocosos de las zonas recién abandonadas por el glaciar Upsala y Viedma se notó la erosión diferencial ejercida dependiendo la presencia de rocas de origen volcánico (Complejo El Quemado) o de aquellas de origen marino-sedimentario (Fm. Río Toro y Fm. Mayer) (Kraemer y Riccardi, 1997), las primeras más duras que estas últimas. En este sentido, la capacidad de remoción de material por parte del glaciar terminará definiendo la resistencia ejercida por el lecho para fluir.

Nota metodológica

Para la identificación y cuantificación de la fluctuación glaciar se utilizaron 26 escenas de los satélites LANDSAT 5, 7 y 8, plataformas satelitales con visión multispectral. La detección y digitalización de los frentes se realizó manualmente mediante el método de fotointerpretación en el Sistema de Información Geográfica Qgis 2.14. Esta decisión estuvo fundamentada en la difícil detección automática debido a la frecuente presencia de nubes y témpanos en las adyacencias a los frentes glaciales.

Eventos de fusión supraglacial (2001-2016)

La fusión glaciar ocurre cuando uno o más cristales de hielo cambian su estado de agregación de sólido a líquido. La fusión puede ocurrir en la superficie (supraglacial), en el interior del cuerpo de hielo (englacial), y en la base (subglacial), sin embargo, la supraglacial es la que mayor cantidad de escorrentía aporta (Bennett y Glasser, 2009). Existe un fuerte consenso en que la fusión y su patrón espacio-temporal tienen un fuerte impacto en la dinámica glaciar (McCabe et al., 2011).

Adicionalmente, otras fuentes de alimentación como la lluvia o agua subterránea pueden ser estímulos importantes. El entendimiento de la hidrología glacial es importante por diversas razones: 1) importante o única fuente de agua en diversas partes del mundo; 2) la hidrología glacial ejerce un importante control en la dinámica glacial. La escorrentía a través de los glaciares está íntimamente relacionada a procesos tales como desplazamiento basal, ablación, transferencia de calor, desprendimiento y flotación de zonas terminales; 3) el drenaje repentino de los reservorios de agua de fusión supraglacial (también englacial y subglacial) puede significar una amenaza para poblados aguas abajo; 4) el agua de fusión remueve detritos localizados sobre el glaciar, en su interior o en la base de este, transportándolos más allá de sus límites y, posteriormente, depositándolos. Históricamente, los depósitos glaciares (*till*) han sido aprovechados por su aptitud para el desarrollo de la agricultura debido a su estructura no ordenada.

En la CRS la extensión ocupada por los eventos de fusión supraglacial tiene una marcada estacionalidad, frecuentes durante los meses de verano incluso en las altas cumbres (>3000 m). En ese sentido, las principales diferencias entre la fase invernal y estival se observaron en la cantidad y extensión de los eventos de fusión. A lo largo de toda la serie se notó que durante el periodo estival (octubre/abril) el 50%, o más, del área glacial estuvo en fusión (con máximos del 75% en el verano del 2013). Por el contrario, durante la fase invernal los eventos de fusión se redujeron drásticamente e incluso se ausentaron en los meses de junio-julio (excepto 2014 y 2016). En términos de cuenca, los eventos de fusión comenzaron a generalizarse sobre la superficie glacial a partir del 2010, con un predominio de anomalías positivas. El mayor evento de fusión supraglacial superó el 80 % del área glacial de la CRS y ocurrió en enero de 2013, superando un 20% de superficie en fusión media histórica para ese mes (2001-2016). Otro aspecto a mencionar, tiene que ver con que la distribución espacial de estos eventos está controlada, principalmente, por la elevación. Entre todos los glaciares analizados, el frente del Perito Moreno es el que a menor elevación se encuentra (210 m.s.n.m.), y es allí donde se registró la mayor cantidad de días en fusión a lo largo de un mismo año. Durante el año 2016, en ese glaciar ocurrieron eventos de fusión supraglacial en la zona terminal el 33 % de los días (más de 100 días).

Entre las posibles causas analizadas, la Temperatura Superficial del Hielo (TSH) fue la que explicó en un 92 % la variabilidad de los eventos de fusión supraglaciar (p -value $< 0,005$) a través de una relación cuadrática. De lo anterior, se desprende que por cada grado centígrado de aumento de TSH la superficie en fusión se duplicará. Entre los efectos de los eventos de fusión supraglaciar, se observó que impactan directamente en los niveles lacustres ($r=0,86$) con un retardo temporal de 2 meses debido a la todavía ineficiente red de drenaje supraglaciar, englaciar y subglaciar durante el máximo pico de fusión (diciembre-enero).

Nota metodológica

Para reconstruir la temperatura superficial de los glaciares (TSH) se usó el producto térmico de MODIS del satélite Terra (MOD11A1). Nótese que no se incluyó el producto MODIS derivado del satélite Aqua debido al deficiente funcionamiento de una de las bandas espectrales (Aguirre et al., 2018). El producto MOD11A1 de ~1 km de resolución espacial utiliza la técnica de ventana partida (*Split Windows*) con las bandas 31 y 32 de MODIS (10.78-11.28 μm y 11.77-12.27 μm , respectivamente) (Wan 2013). Este producto proporciona dos valores de temperatura superficial por día (diurno y nocturno). En latitudes altas, estos valores se seleccionan de un número mucho mayor de mediciones diarias debido a la convergencia de las órbitas de los satélites (Østby et al., 2014). Las mediciones satelitales de TSH requieren cielos despejados, y las áreas cubiertas por nubes son eliminadas a través de la máscara incluida en ese producto y derivada de MOD35_L2 (Ackerman et al. 2008).

Cada imagen MOD11A1 fue binarizada por la condición “ $\geq -1^\circ\text{C}$ ”, en donde valores por encima de ese umbral indican superficies en fusión (Hall et al. 2018). En efecto, cada imagen mostró los pixels en fusión para ese día, pudiéndose estimar el área en fusión y los sectores donde ocurrió. La frecuente presencia de nubes sobre el CHPS supuso que en numerosas imágenes este se mostrara parcialmente cubierto. Por lo tanto, en ocasiones donde extensas superficies del CHPS fueron afectadas por fusión pueden haber sido omitidas debido a la presencia de la cubierta nubosa, cuantificándose únicamente aquellas áreas sin nubes (subestimación del área en fusión). De hecho, una imagen invernal desprovista de nubes podría reportar la misma cantidad de pixels en fusión “detectados”, o incluso mayor, que aquella de verano. Para minimizar este sesgo se propuso la estandarización de las superficies en

fusión. El resultado fue una probabilidad de ocurrencia de días en fusión. El detalle metodológico puede ser visto en Lo Vecchio (2020).

Glaciares y sociedad, un futuro en común

El paisaje resultante de la dinámica glacial ha ejercido un control acerca de las actividades llevadas a cabo en esta región, representadas en tres dimensiones: la formación de tierras aptas para el uso y aprovechamiento humano; fuente de agua dulce para el consumo y desarrollo humano; y su significado como amenaza natural.

Disponibilidad de tierras y aprovechamiento humano

La disponibilidad de tierras, sus aptitudes son un condicionante acerca de las actividades humanas capaces de ser desarrolladas. En la CRS, la mayor presencia y uso del espacio es en la cuenca media, donde se emplaza el sistema lacustre Argentino-Viedma. Allí, los usos del suelo son: agrícola-ganadero, residencial, comercial y servicios.

Históricamente, el uso agrícola-ganadero caracterizó a esta cuenca, siendo la ganadería ovina y bovina las actividades más importantes dentro del producto bruto geográfico de la CRS (Ministerio de Hacienda 2018; Consejo Federal de Inversión 1973). En las inmediaciones los grandes lagos la disponibilidad de suelos aptos para el crecimiento natural de pastizales jugó un rol clave en el establecimiento y desarrollo de esta actividad. El origen de esos suelos tiene un profundo vínculo con la dinámica glacial, derivados de depósitos glaciales y glacifluviales (costa sur del lago Argentino). Indicios de cambios en el patrón productivo comenzaron a ser visibles a partir de 1973, que de acuerdo al informe técnico presentado por el Consejo Federal de Inversión (1973): *“Las actividades relacionadas a la prestación de servicios tienden a incrementarse y concentrarse (...) lo que hace prever para los próximos años el desarrollo integral de la zona, basado fundamentalmente en la utilización indirecta de las bellezas naturales de la región”*. Este hecho ha sido particularmente evidente en la expansión del área urbana de El Calafate y El Chaltén entre 1986 y 2016. En 1986 la localidad de El Chaltén aún no cumplía un año de existencia y solo había unas pocas edificaciones (dependencias provinciales y del Parque Nacional Los Glaciares); sin embargo, a comienzos del 2016 el área ocupada era de 83 Ha. Por su parte, El Calafate también experimentó una fuerte expansión, en 1986 su área era de 94 Ha,

mientras que en 2016 de 1679 Ha (~18 veces la superficie de 1986). La expansión del área urbana en ambas localidades fue acompañada de un crecimiento neto en la población residente en el departamento de Lago Argentino², pasando de 1994 habitantes en el año 1970 a más de 18000 en 2010, según el Censo Nacional de Población de ese año. El vasto crecimiento demográfico en una región que hasta el momento perdía población (Consejo Federal de Inversión 1973) fue posible y estimulado por el desarrollo del turismo vinculado a los glaciares (de ahora en adelante turismo glacial).

Fuente de agua y desarrollo humano

La accesibilidad al agua es un factor esencial para el establecimiento de los enclaves humanos. En la República Argentina, el 55 % de las localidades están emplazadas a menos de 5 km de distancia de un cauce (**Figura 11**). Esto aún es mucho más evidente en regiones como la Patagonia extrandina donde las precipitaciones son escasas. En ese contexto, el río Santa Cruz se posiciona como la fuente de agua del futuro en la República Argentina por dos condiciones: 1) drena la cubierta glacial más importante del país, 2) tiene origen y fin dentro del territorio nacional. La primera condición supone que este río es un reservorio invaluable, en un marco de marcadas reducciones de precipitaciones y caudales de los ríos andinos (Penalba y Rivera, 2016). En referencia a la segunda condición, posibilita gestionar y proteger la calidad del recurso, aunque en la práctica todavía deban mejorarse los sistemas de control y consulta popular.

²Lago Argentino es el departamento en el cual se localizan El Chaltén y el Calafate, siendo esta última la localidad cabecera del departamento. Son esas dos localidades quienes concentran la mayor población (+90%) de dicho departamento. Con excepción de la localidad de Tres Lagos, en donde habitan menos de 500 personas, el resto son parajes y estancias.

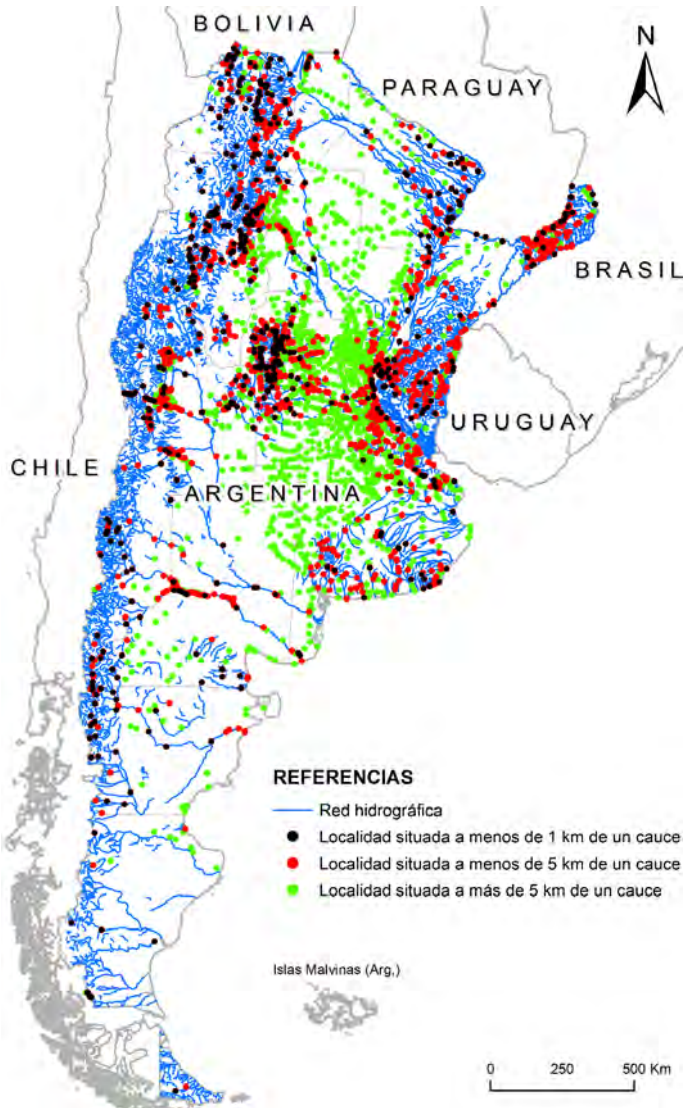


Figura 11. Distribución espacial de las localidades de la República Argentina respecto de la red hidrográfica nacional. Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

El caudal medio histórico del río Santa Cruz (periodo 1955-2016, medido en la estación de aforo Charles Fuhr) es de $713 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con máximos superiores a $2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y con una tendencia al incremento de su caudal igual a $0,1485 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{mes}^{-2}$ (p -value $< 0,05$). Esta tendencia de aumentos de caudales ya fue detectada desde principios del siglo XXI por la Unión Transitoria de Empresas China Gezhouba Group Company Limited -Electroingeniería S.A.- Hidrocuyo S.A., quienes presentaron los primeros informes técnicos para la instalación de un sistema de represas sobre ese río a fin de generar energía hidroeléctrica (Secretaría de Estado de Ambiente 2017). Ese proyecto es considerado de desarrollo e infraestructura energética; sin embargo, numerosas protestas y campañas de concientización han tenido lugar en oposición a su construcción. Los reclamos están fundados en el impacto que las represas tendrían sobre el ecosistema de la CRS, y por la probabilidad de que la cota de las represas alcance, e incluso supere, la del Sistema Lacustre Argentino-Viedma. Conforme a los análisis realizados, pequeños cambios en el nivel del lago Argentino podrían disparar eventos masivos de desprendimiento.

Otro ejemplo que pone de manifiesto la relación glaciares y sociedad es el turismo glacial. El turismo glacial es la principal fuente de empleo y de divisas de las localidades de El Chaltén y El Calafate, traducido en hotelería, servicios gastronómicos, traslados y guías por ambientes naturales. Esas localidades concentran más del 60% de las plazas hoteleras de toda la provincia de Santa Cruz atendiendo a la alta demanda de visitantes al Parque Nacional Los Glaciares (PNLG), primer parque Nacional más visitado del país. Dentro del PNLG, el caso del glaciar Viedma es paradigmático: hasta el año 2015 una propuesta de navegación al frente de ese glaciar y una posterior caminata sobre este era una de las ofertas turísticas más demandadas en la localidad de El Chaltén. Un fuerte retroceso experimentado por el glaciar entre los años 2015 y 2016, el más intenso de los últimos 40 años, condujo a que la posición frontal de ese glaciar se emplazara en un sitio en donde el acceso a este sea muy dificultoso, sobre todo por la necesidad del uso de material de escalada por parte de los visitantes. Esa situación suprimió instantáneamente la oferta turística propia del glaciar, y en efecto, los empleos asociados.

CRS, un ambiente de multiamenazas

En la CRS las amenazas naturales son diversas, no solo por su origen, sino también debido a la manera en que se traducen al espacio geográfico. En la CRS pueden distinguirse, como mínimo, las siguientes amenazas: *seiches*, remoción en masa, GLOF, inundaciones, sismicidad, vulcanismo, lahares e incendios. Con excepción de la sismicidad, el vulcanismo y los incendios, el resto de las amenazas están directamente asociadas a la dinámica glacial. El cambio climático y la intensificación de las actividades humanas en ambientes de montaña ha incrementado el interés por el entendimiento del riesgo asociado (Orlove et al., 2008).

Las amenazas naturales en la CRS están espacialmente superpuestas. Cada una de estas tiene una influencia distinta en términos espaciales y temporales. Mientras que la actividad volcánica puede tener periodos de recurrencia decadales o de centurias y una influencia regional, los *seiches* pueden tener una recurrencia diaria y una influencia local. Sin embargo, esa superposición debe ser atendida por la concatenación de las amenazas. La efectivización de una de ellas puede desatar otras. Así pareciera ser el caso del *seiche* del canal Upsala ocurrido en febrero de 2013, donde un deslizamiento ocurrido en la ladera del cerro Mc. Andrew lo produjo (Moragues et al. 2019). En términos espaciales, la cuenca alta es la que mayor cantidad de amenazas presenta. Sin embargo, es la cuenca media la que mayor exposición posee, fundamentalmente por la concentración de la infraestructura humana (**Figura 12**).

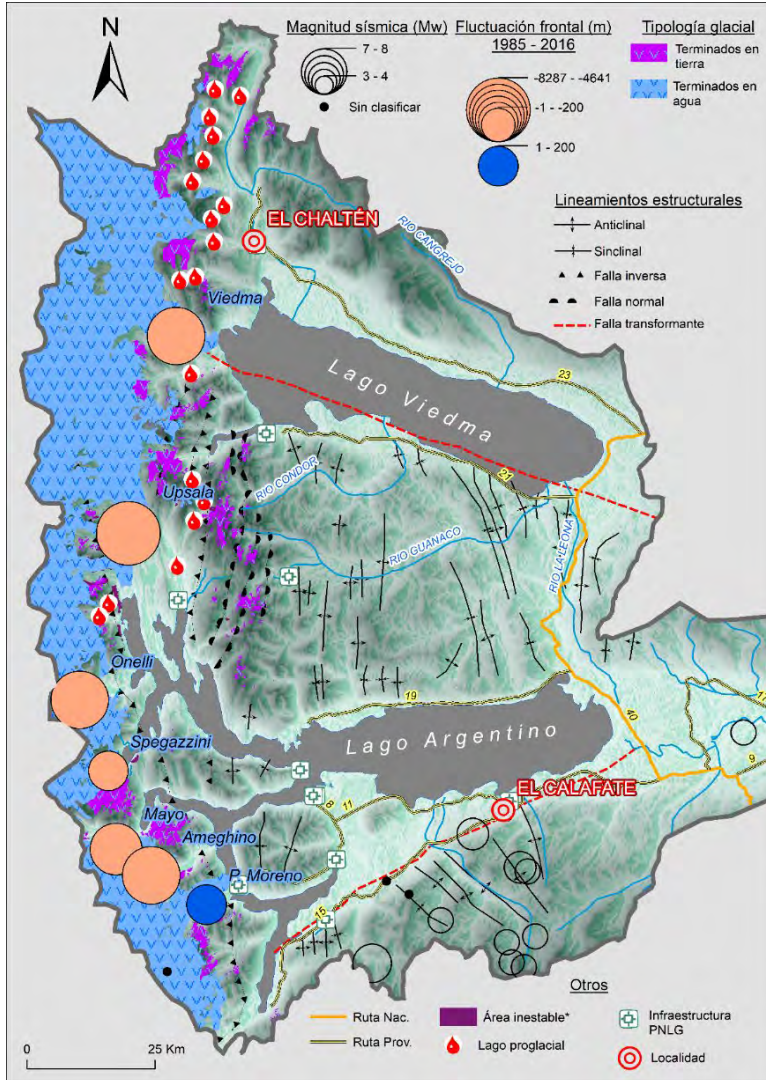


Figura 12. Mapa de correlación de los aspectos dinámicos de la cubierta glacial de la CRS y las amenazas derivadas. Los lineamientos tectónicos han sido extraídos de Ghiglione et al., (2009), mientras que las áreas inestables (*) de Moragues et al., (2019). Imagen extraída de Lo Vecchio (2020).

CONCLUSIONES

La cuenca del río Santa Cruz (CRS) es un sistema ambiental complejo donde múltiples procesos naturales y antrópicos se superponen e interactúan a diversas escalas espacio-temporales. El constante dinamismo de la CRS dispara mecanismos de retroalimentación en la búsqueda continua de un equilibrio dinámico. En ese sentido, el ambiente criosférico de la CRS ha acusado importantes cambios en los últimos treinta años, traducido en la reducción de 128 km² (4 km²a-1).

En la tesis comentada se ha puesto de manifiesto la multiescalaridad espacio-temporal de los procesos glaciológicos estudiados. El análisis de las fluctuaciones frontales ha dejado en evidencia la multicausalidad de la dinámica glacial, al mismo tiempo que se debiera visualizar a cada cuerpo de hielo como un caso único. De ello se desprende, la imposibilidad de extrapolar el comportamiento de un único glaciar al resto de la cuenca, o de la región, ni siquiera teniendo en cuenta a los denominados “representativos” (Viedma, Upsala y P. Moreno). En conjunto los glaciares Viedma, Upsala, Onelli, Spegazzini, Mayo y Ameghino han retrocedido 19,2 km entre 1985 y 2017; un aspecto fundamental ha sido la marcada heterogeneidad presentada. Mientras que el Upsala se retrajo más de 8 km, el Spegazzini lo hizo menos de 0,1 km. Un contraste similar ha sido observado entre los glaciares P. Moreno y Ameghino, donde el primero tuvo un saldo positivo de 0,1 km al mismo tiempo que el Ameghino retrocedió 2,8 km durante el mismo periodo (1985-2017). De mediar un control climático, las fluctuaciones debieran poseer cierta homogeneidad o tendencia, similar a lo ocurrido en la cordillera mendocina (Andes centrales).

Entre todas las variables disparadoras abordadas se descarta la influencia transversal sobre todos los glaciares analizados. Por el contrario, cada variable disparadora tuvo su preponderancia sobre ciertos glaciares. Ejemplo de ello son las temperaturas superficiales del lago, que mostraron un fuerte vínculo respecto de las fluctuaciones del Viedma y en menor medida con el P. Moreno; al mismo tiempo, los niveles lacustres sugirieron un fuerte control sobre los glaciares Upsala y P. Moreno, aunque los glaciares Onelli y Viedma fueron insensibles a esta influencia.

Respecto de los eventos de fusión, y su posterior impacto en los niveles lacustres, son un agente dinamizador si se considera que los frentes de los glaciares Upsala y P. Moreno se mostraron muy sensibles a los cambios en los niveles lacustres. El efecto de los eventos de fusión sobre los niveles del lago Argentino ha sido caracterizado por un fuerte vínculo ($R=0,86$). Debe hacerse la salvedad que la influencia de la fusión sobre los niveles lacustres mostró un retardo de dos meses, manifestando la ineficiencia de la red de drenaje englacial y subglacial.

De lo expuesto, se deriva la confirmación y relevancia de la hipótesis inicialmente planteada, dejando en evidencia la complejidad y relación existente entre los procesos que intervienen en la cuenca estudiada. Esta complejidad debe ser adecuadamente entendida y abordada por los gestores del territorio mediante un manejo propicio que contempla: 1) el cuidado y aprovechamiento de la reserva de agua dulce más grande de Argentina; y 2) la mitigación de las amenazas naturales a las cuales se encuentran expuestas las localidades de El Chaltén y El Calafate, sitios cada vez más poblados y sujetos a la especulación inmobiliaria.

La visión geográfica de la relación glaciares - sociedad ha cobrado gran sentido a lo largo de esa tesis, sobre todo considerando que la dinámica glacial pasada y presente ha condicionado las posibilidades de ocupación y aprovechamiento de la cuenca por parte del hombre. Inicialmente, la disponibilidad de vastas extensiones de pasturas naturales y cuerpos de agua estimuló la actividad ganadera, la cual fue la principal actividad hasta comienzos de la década de los 80 del siglo pasado. Con posterioridad, la matriz productiva comenzó a reconvertirse, direccionándose hacia el turismo glaciar. Eso condujo a que las localidades de El Chaltén y El Calafate experimentaran una fuerte expansión urbana, al punto de incrementar su área 18 veces entre 1985 y 2017 (El Calafate).

Finalmente, y a modo de corolario, surge la imperiosa necesidad de un trabajo y esfuerzo mancomunado entre el estado municipal, provincial, nacional, Parque Nacional Los Glaciares y entidades científicas para fortalecer y establecer una visión interdisciplinaria del/los fenómenos a monitorear y/o analizar mediante un abordaje integral con provisión de datos certeros. A partir de la integración de algoritmos robustos y tecnología de punta, y la integración de las disciplinas del sensoramiento remoto con adecuados métodos de procesamiento de datos geoespaciales, se

obtendrán soluciones eficientes y precisas en la detección de cambios en los glaciares en vistas de desarrollar un plan de ordenamiento territorial y gestión del riesgo capaz de preservar el ambiente natural, al mismo tiempo que reducir el impacto de la dinámica ambiental sobre el espacio humanizado.

BIBLIOGRAFÍA

Ackerman, S. A., R. E., Holz, R. Frey, E. W. Eloranta, B. C. Maddux, y M. McGill. (2008). Cloud detection with MODIS. Part II: Validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (7): 1073-86. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA1053.1>.

Adaros, R. (2003). *Sismicidad y Tectónica Del Extremo Sur de Chile*. Memoria de Magister, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad. de Chile.

Bennett, M. y Glasser, N. (2009). *Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms, 2nd Edition*. Second. Oxford: John Wiley & Sons.

Consejo Federal de Inversión. (1973). *Departamento Lago Argentino. Estructura económica y social*. Santa Cruz. <http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/sites/2/1973/01/12401.pdf>.

Cuffey, K.M., y Paterson, W.S.B. (2010). *The physics of glaciers*. Editado por Academic Press. *Journal of Glaciology*. Amsterdam: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.3189/002214311796405906>.

Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances In Geosciences* 7 (1): 1-9. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>.

Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., y Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281 (3-4): 180-95. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>.

Ghiglione, M. C, Suarez,F., Ambrosio, A., Poian,G., Cristallini, E., Pizzio, M.F., Reinoso, M.,et al. (2009). Structure and Evolution of the Austral Basin Fold-Thrust Belt, Southern Patagonian Andes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (1): 215-26.

Hall, D., Cullather, R., DiGirolamo, N., Comiso, J., Medley, B. y Nowicki,S. (2018). A multilayer surface temperature, surface albedo, and water vapor product of Greenland from MODIS. *Remote Sensing* 10 (4): 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs10040555>.

IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares, y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2018). *Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares*. www.glaciaresargentinos.gob.ar.

- Jansson, P., Hock, R. y Schneider, T. (2003). The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology* 282: 116-29. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00258-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00258-0).
- Kraemer, P., y Riccardi, A. (1997). Estratigrafía de la región comprendida entre los lagos Argentino y Viedma (49 40'-50 10' lat. S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52 (3): 333-60.
- Lo Vecchio, A., Lenzano, M., Richiano, S., y Lenzano, L. (2016). Lithologic identification and characterization using ETM+ (Landsat 7). Study case of the Upsala glacier basin, Argentine. *Revista de Teledetección* 2016 (46): 57-72. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.4482>.
- Lo Vecchio, A. (2020). Dinámica glaciaria de la cuenca del río Santa Cruz, Andes Patagónicos Australes: estudio y análisis multiescalar mediante el uso de geotecnologías, Universidad Nacional de Cuyo.
- Martinić, M. (1988). Actividad volcánica histórica en la región de Magallanes. *Revista Geológica De Chile* 15 (2): 181-86. <https://doi.org/10.5027/andgeoV15n2-a07>.
- Martinić, M. B. (2008). Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia Austral y la Tierra del Fuego. *Magallania* 36 (2): 5-18. <https://doi.org/10.4067/S0718-22442008000200001>.
- McCabe, M. F., Chylek, P., Manvendra K D. (2011). *Detecting ice-sheet melt area over western Greenland using MODIS and AMSR-E data for the summer periods of 2002-2006*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.501830>.
- Meier, M.F., y Roots E.F.. (1982). Glaciers as a water resource. *Nature and Resources*. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF19830896816>.
- Ministerio de Hacienda. 2018. «CARACTERIZACIÓN SOCIO-PRODUCTIVA». Santa Cruz. http://www2.mecon.gov.ar/hacienda/dinrep/Informes/archivos/santa_cruz.pdf.
- Moragues, S., Lenzano, M.G., Moreiras, S., Lo Vecchio, A., Lannutti, E., y Lenzano, L. (2019). Slope instability analysis in South Patagonia applying multivariate and bivariate techniques on Landsat images during 2001–2015 period. *CATENA* 174 (marzo): 339-52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.024>.
- Moragues, S., Lenzano, M.G., Moreiras, S., Lo Vecchio, A., Lannutti, E., Lenzano, L. (2019). Slope instability analysis in South Patagonia applying multivariate and bivariate techniques on Landsat images during 2001–2015 period. *CATENA* 174 (marzo): 339-52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.024>.
- Orlove, B. S., Wiegandt, E. y Luckman, B. (2008). *Darkening peaks : glacier retreat, science, and society*. University of California Press. https://books.google.com.ar/books?hl=es&lr=&id=vgJ1EKyK8RoC&oi=fnd&pg=PA3&dq=darkening+peaks&ots=Wh0xE5xDX8&sig=xeswnRma8WenH2CP9L_cMNSMqwU&redir_esc=y#v=onepage&q=darkening+peaks&f=false.
- Østby, Torbjørn I., Schuler, T. y Westermann, S. (2014). Severe cloud contamination of MODIS Land Surface Temperatures over an Arctic ice cap, Svalbard. *Remote Sensing of Environment* 142: 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.005>.

Penalba, O. y Rivera, J.A. (2013). Future Changes in Drought Characteristics over Southern South America Projected by a CMIP5 Multi-Model Ensemble. *American Journal of Climate Change* 02 (03): 173-82. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.23017>.

Penalba, O., y Rivera, J. A. (2016). Regional aspects of future precipitation and meteorological drought characteristics over Southern South America projected by a CMIP5 multi-model ensemble. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY* 36: 974-86. <https://doi.org/10.1002/joc.4398>.

Secretaría de Estado de Ambiente. (2017). *Informe Técnica N° 41. Comisión Evaluadora del Estudio de Impacto Ambiental: "Proyecto Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Santa Cruz, Represas Presidente N. Kirchner y Gob. J. Cépernic"*; <http://saludsantacruz.gob.ar/secretariadeambiente/wp-content/uploads/2017/11/dictamen-tecnico-represas.pdf>.

Shin, S., Minowa, M., Daiki Sakakibara, D., Skvarca, P., Sawagaki, T., Ohashi, Y., Naito, N., y Chikita, K. 2016. Thermal structure of proglacial lakes in Patagonia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121 (12): 2270-86. <https://doi.org/10.1002/2016JF004084>.

Vich, A., (1996). *Aguas continentales: formas y procesos*. Primera. Mendoza: Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua.

Wan, Z. (2013). MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide. *Contract*, (30). <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11B3.006>.

White, A., y L. Copland. (2015). Decadal-scale variations in glacier area changes across the Southern Patagonian Icefield since the 1970s. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 47 (1): 147-67. <https://doi.org/10.1657/AAAR0013-102>.

Williams, Richard, S. y Ferrigno, J. (2012). State of the Earth's Cryosphere at the Beginning of the 21st Century: Glaciers, Global Snow Cover, Floating Ice, and Permafrost and Periglacial Environments - Global Snow Cover. *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*, 254. <http://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery1-fig16.html>.

EL AUTOR

Andrés Lo Vecchio Repetto, es Geógrafo profesional y Doctor en Geografía por la Universidad Nacional de Cuyo. Actualmente posee una beca postdoctoral de CONICET y es Profesor Asociado Efectivo de las de Filosofía y Letras (UNCuyo). Su actividad científica está mayormente orientada al estudio de la dinámica glaciar en los Andes Argentinos a través de la integración de técnicas geomáticas, todo ello traducido en más de 10 publicaciones científicas en revistas de relevancia internacional. Además, también está interesado en el desarrollo y aplicación de herramientas digitales en la enseñanza de la Geografía a través de la construcción de la primera Mesa Topográfica Digital de una Universidad Pública de la República Argentina y en el desarrollo de modelos de Realidad Aumentada de diversos escenarios naturales y humanizados.

RESEÑAS Y CRÍTICA BIBLIOGRÁFICA



Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. *Atlas de Glaciares de la Argentina* / compilado por Leandro García Silva ... [et al.].
1ra edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2019. 224 páginas ; 28 x 23 cm. ISBN 978-987-46796-9-7

Emilia Carolina Martínez

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA).
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

 caromartinez.150588@gmail.com



Atendiendo el lineamiento del dossier, esta reseña pretende involucrarse en la temática de las masas de hielo en Argentina y su importancia como fuentes y reservas de agua dulce en los Andes. Unos 7 millones (18%) de habitantes de Argentina (García Silva, L., et al., 2019) están vinculados directa o indirectamente a su desarrollo y gestión, por lo que es fundamental conocer donde se localizan y si presentan grandes cambios.

Hay varias publicaciones científicas que refieren a los glaciares argentinos, sin embargo, hay una carencia de libros de texto en los últimos 3-5 años. En ese contexto, recientemente fue publicado *el Atlas de*

glaciares de la Argentina, libro que esclarece su estado actual, al cual se accede desde la página del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Se trata de un trabajo de 224 páginas publicado el año 2019 en español por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) en conjunto con el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) y el Instituto Antártico Argentino (IAA).

En él se muestran principalmente los resultados derivados del Primer Inventario Nacional de Glaciares (ING) de Argentina presentado en 2018 (debe actualizarse cada cinco años), y que surge en el año 2010 en el contexto de la promulgación de la Ley Nacional N°26639 de Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación del Ambiente Glaciar y Periglacial, la cual “viene a suplir esa necesidad de relevar un recurso hídrico estratégico” y dar cumplimiento a la Ley General del Ambiente N°25675 del año 2002 (op. cit.). Como su nombre lo indica, la mencionada ley no solo le da valor al ambiente glaciar sino también al periglacial, quedando plasmada su importancia como sistema ambiental. En ese marco, Argentina es el único país del mundo en tener una ley específica para su protección.

Al comienzo, el Atlas presenta un marco teórico que expone los principales conceptos, describe cómo funciona el sistema criosférico e incluye figuras explicativas. Lo anterior se complementa con notas metodológicas y un glosario glaciológico al final del libro. Esto permite que los lectores comprendan el origen, importancia y exposición a la cual se enfrentan los glaciares.

El trabajo propone un análisis en dos escalas: ambientes glaciares (Andes desérticos, centrales, del norte y del sur de la Patagonia y de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur; Sector Antártico Argentino) y 36 cuencas glaciarias. Por otro lado, las categorías básicas y morfológicas de clasificación de las masas de hielo son pertinentes, ya que siguen lineamientos de *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS) y *World Glacier Monitoring Service* (WGMS). Por último, reconoce 6 tipos de geoformas: glaciares descubiertos (GD), glaciares cubiertos (GC), manchones de nieve (MN), glaciar de escombros activo (GEA), glaciar de escombros inactivo (GEI) y glaciar cubierto con glaciar de escombros (GCGE). Para mayor información metodológica se

sugiere ver el manual del ING (http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/legales/manual_ING_2014.pdf).

Los resultados muestran que de los cuerpos de hielo relevados (son 16.968 y cubren 8.484 km²) hay 16.078 (94%) en los Andes, que cubren 5.769 km² (68%), de los cuales 4.646 km² se encuentran en áreas naturales protegidas y aportan a 34 cuencas andinas de origen glaciar.

En lo que respecta a superficie ocupada por cada categoría; hay predominio de GD y MN en los Andes desérticos, GD y GEA en los Andes centrales, gran predominio de GD y de MN en los Andes del norte de la Patagonia, gran predominio de GD en los Andes del sur de la Patagonia, y de GD y MN en los Andes de Tierra del Fuego. Lo cual es relevante en el contexto actual debido a que, como es de nuestro conocimiento, los GD y MN son más afectados por el cambio climático, sobre todo los de menor tamaño.

A lo largo del trabajo se indican las características del sitio que condicionan la distribución de los distintos tipos de glaciares, los glaciares más relevantes, su altitud mínima promedio de localización y las áreas protegidas que cuentan con estos; que muestran las diferencias entre regiones latitudinales y la influencia de la topografía en la distribución de los distintos tipos de masas de hielo. Mientras que de las cuencas se indican su carácter interjurisdiccional, ubicación, superficie total, localidades, balance hídrico anual medio, sus áreas protegidas con glaciares, los glaciares destacados, usos de la tierra, ecorregiones y principales complejos productivos. Se complementa con una tabla con información glaciaria (número, área según el tipo y área total) que es útil para otros tipos de análisis ya que se acompaña con mapas de localización de cada cuenca con cuerpos de hielo y de la distribución de estos últimos, así como de fotografías de los distintos paisajes que cuentan con un análisis cada una.

Como conclusión; en el libro se indica que las cuencas en su mayoría tienen un balance hídrico negativo. El cual es potenciado por el retroceso de los glaciares ante un escenario ya conocido de aumento de la temperatura terrestre en el norte y una disminución de las precipitaciones en el sur, que ocasiona el derretimiento (pérdida

de volumen y retroceso) y disminución de su “alimentación” y lleva a una disminución de su efecto hidrológico compensador.

Así, todas las masas de hielo cumplen un rol fundamental en la hidrología de las cuencas andinas, aún más en algunos lugares como en los Andes desérticos y centrales donde la única fuente de alimentación de los ríos es principalmente glaciaria en años de sequía. Allí toman mayor relevancia los GC y los GEA.

En este contexto; en el libro se provee información abarcativa, espacialmente estandarizada en su metodología y accesible para el conocimiento general, investigación, gestión y coordinación política de estos ambientes y del agua.

BIBLIOGRAFÍA

García Silva, Leandro, et al., comp. (2019). Atlas de Glaciares de la Argentina. 1ra edición. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 224 pp. ISBN n° 978-987-46796-9-7. (Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/glaciares/atlas>).

LA AUTORA

Emilia Carolina Martínez es Geógrafa egresada de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Cuyo. Obtuvo una beca doctoral de CONICET en el ámbito del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Su actividad científica está vinculada al estudio ambiental, principalmente, mediante el procesamiento digital de imágenes en un entorno GIS.