

# 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](https://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](mailto:ana.hernandez@upla.cl)

**Jean Pierre Francois Sepúlveda**  [orcid.org/0000-0001-7616-0762](https://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](mailto:jpfrancois@upla.cl)

**Valentina Ignacia Contreras Figueroa**  [orcid.org/0000-0001-8498-2053](https://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](mailto:valentina.contreras@alumnos.upla.cl)

**Flavia Renne Saud Valero**

Universidad Andrés Bello  
 [f.saudvalero@gmail.com](mailto:f.saudvalero@gmail.com)

**Freddy Alejandro Saavedra Pimentel**  [orcid.org/0000-0003-0298-7198](https://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](mailto: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 nexo 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**).

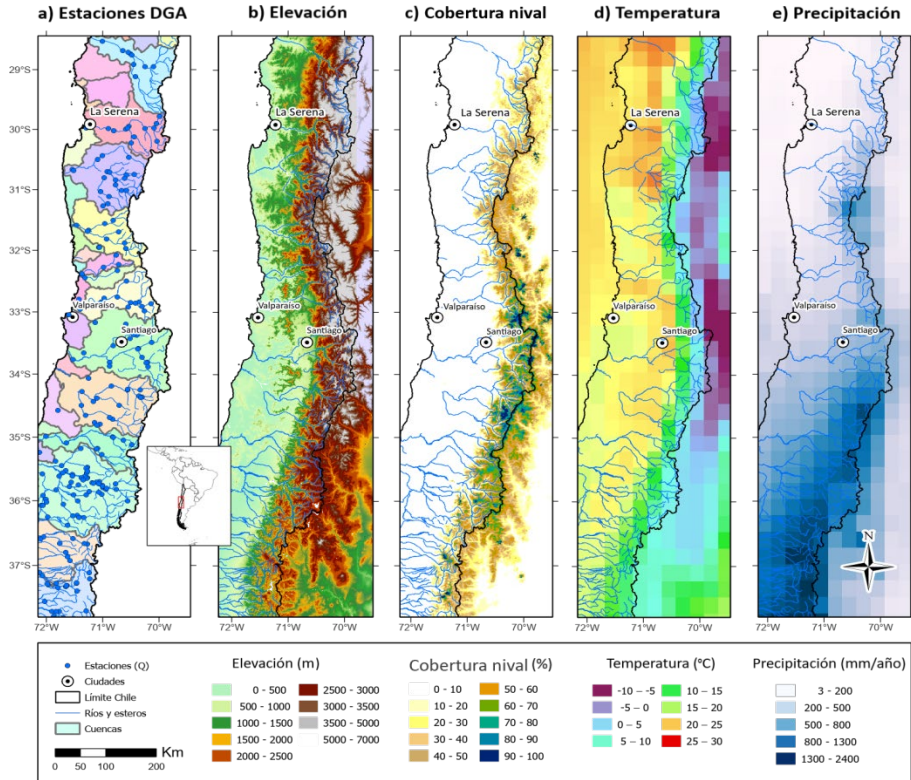
## MATERIALES Y MÉTODOS

### 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)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup><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 geoprocesamiento 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 DGA<sup>2</sup>. 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

---

<sup>2</sup><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)<sup>3</sup>. 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

<sup>3</sup>El 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 km<sup>2</sup>, 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)<sup>4</sup>. 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*)<sup>5</sup> 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 6<sup>6</sup>. 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

---

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

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

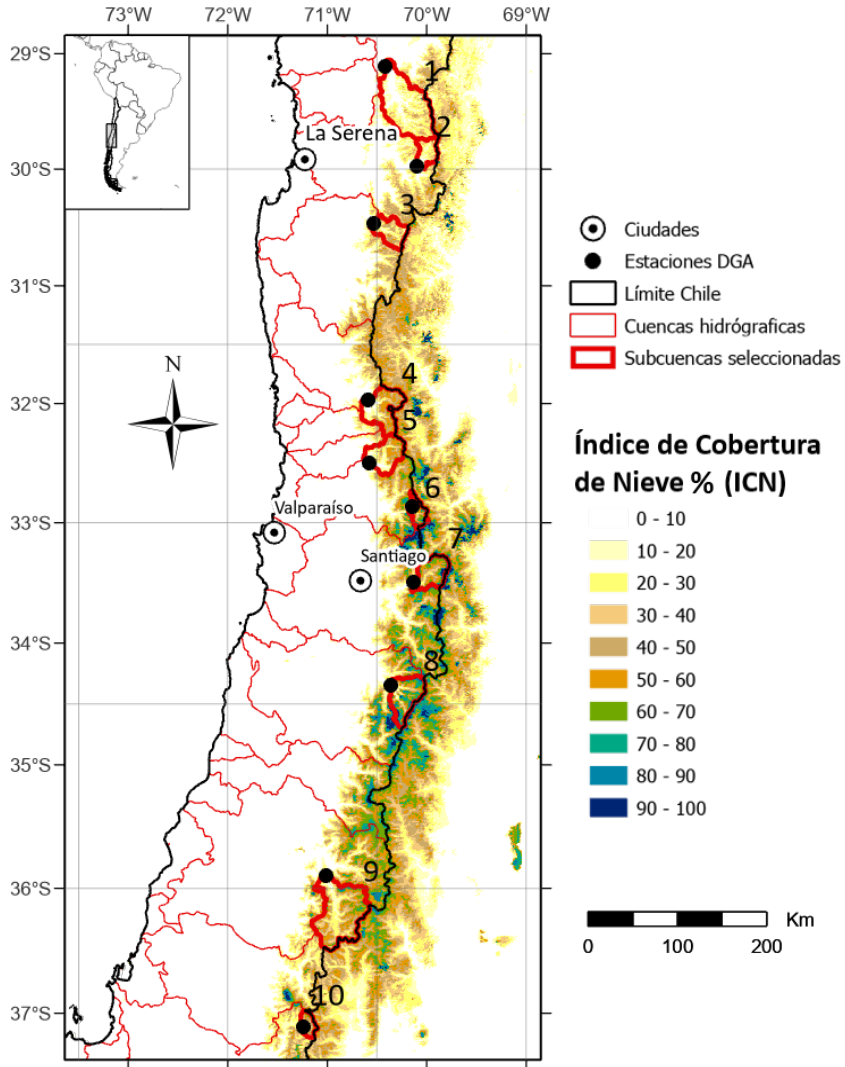
<sup>6</sup><https://explorer.earthengine.google.com/#detail/MODIS%2F006%2FMOD10A1>

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	<a href="http://www.dga.cl">http://www.dga.cl</a>
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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s (**Figura 4a**). Mientras que el área cubierta de nieve va desde 0,5 a 45% de las subcuencas, mostrando los

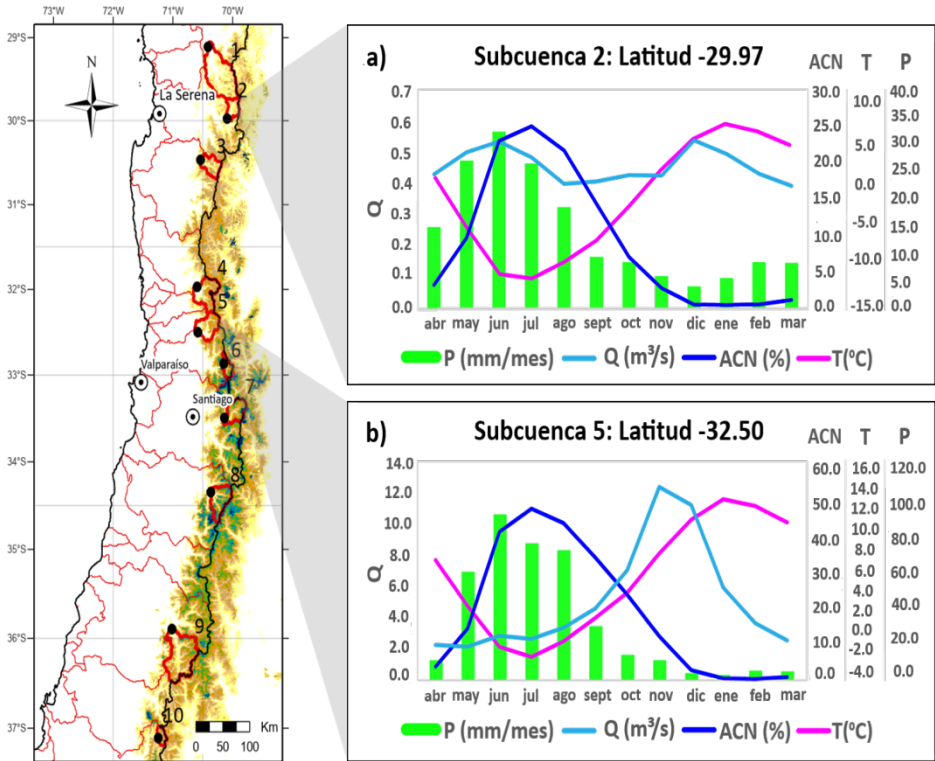
porcentajes inferiores en los extremos del área de estudio y los superiores entre las latitudes 34° y 36,5°S (**Figura 4b**). La categoría de dominancia por cuenca se observan en la(**Figura 4c**). Todas las subcuencas hidrográficas observadas tienen una conexión con la nieve de moderada a fuerte (Anexo). 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

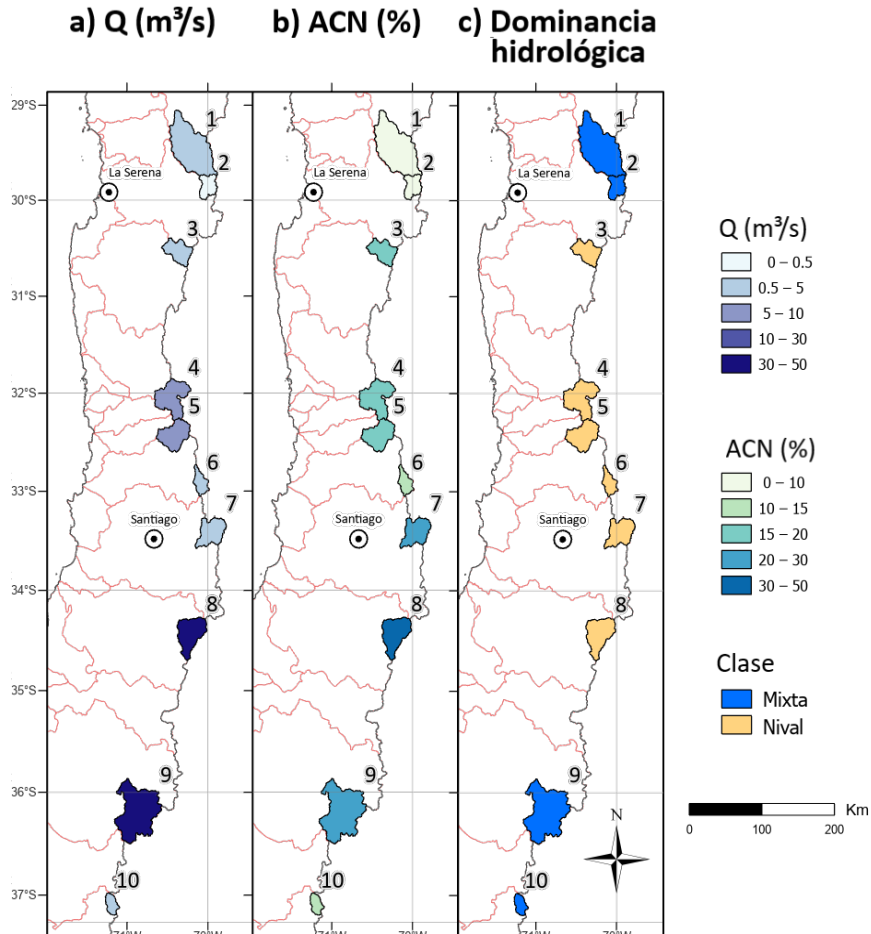
**Tabla 3.** Descripción fisiográfica y climática promedio mensual de los años 2003-2017 por cada subcuenca del área de estudio.

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).

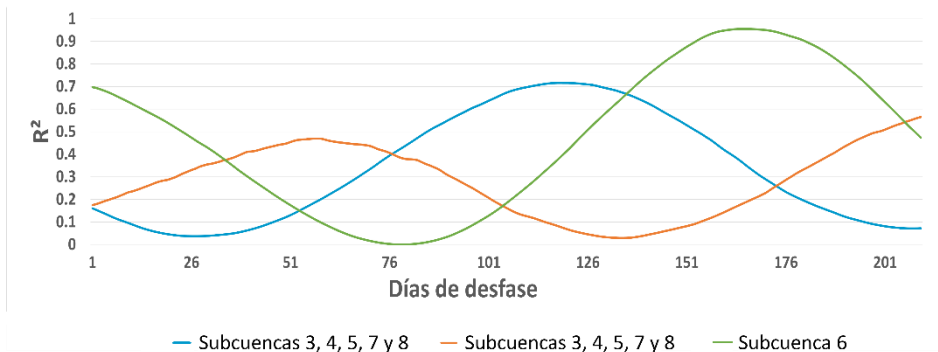


**Figura 4.** Variabilidad espacial del caudal y cobertura de nieve entre subcuencas para la serie temporal (2003-2017) del área de estudio. (a) Distribución espacial del caudal. (b) Distribución del área cubierta de nieve. (c) Dominancia hidrológica de cada subcuenca.

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

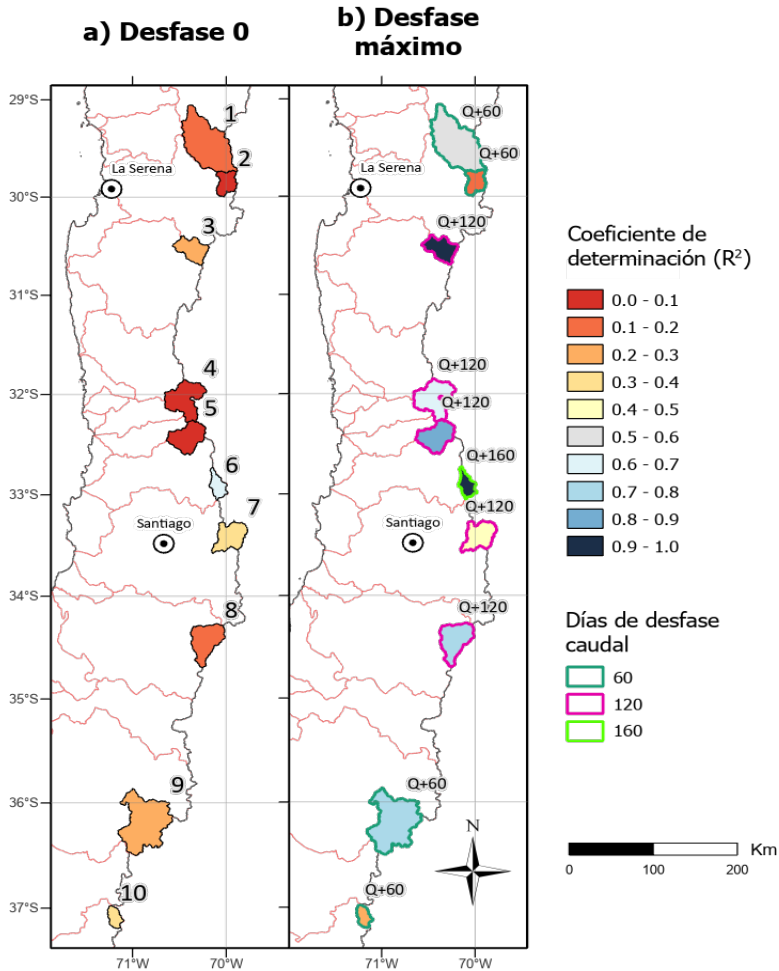


desfase temporal consecutivo de las variables, se observó un patrón de variación de la relación  $R^2$ . Mediante un análisis estadístico de proximidad se realizó una agrupación de las curvas con un comportamiento similar basado en la variación estacional del  $R^2$  y se clasificaron en tres grupos 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**).



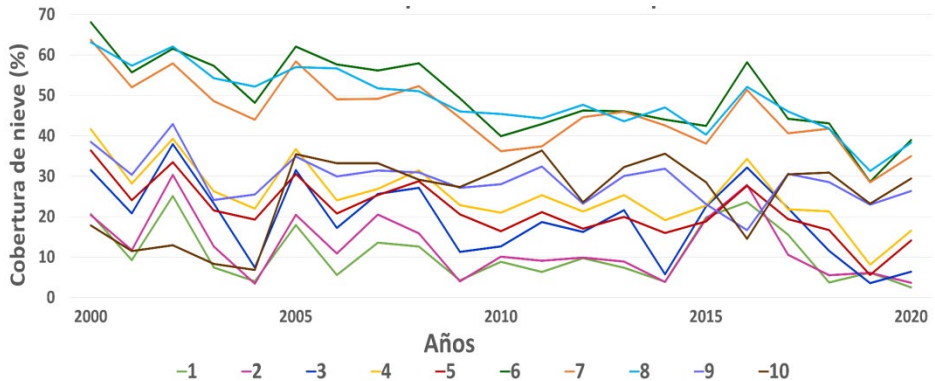
**Figura 6.** Coeficiente de determinación promedio de los años de estudio 2003-2017 por subcuenca para (a) Desfase de cero días y (b) Clasificación de subcuencas según días de desfase con el mayor coeficiente de determinación entre 60 días (Q+60), 120 días (Q+120) y 160 días (Q+160).

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 (km<sup>2</sup>) 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 R<sup>2</sup> 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.

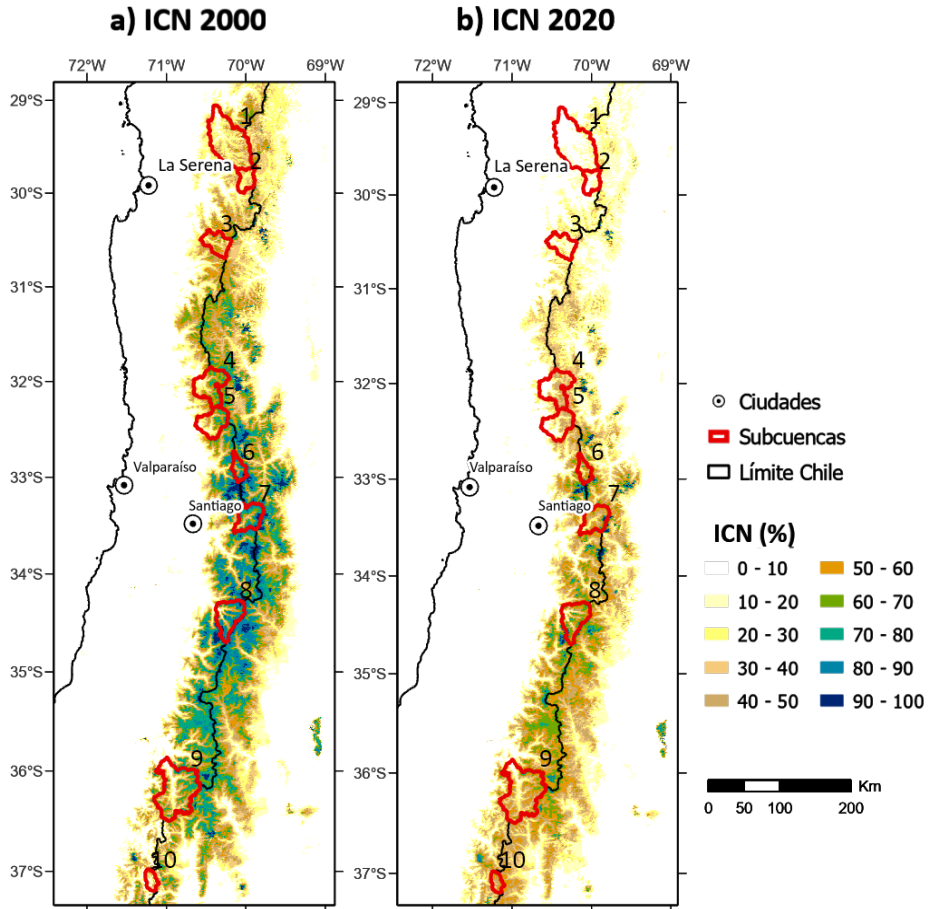


Figura 8. Mapa de variabilidad de ICN anual (a) ICN 2000, (b) ICN 2020.

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.

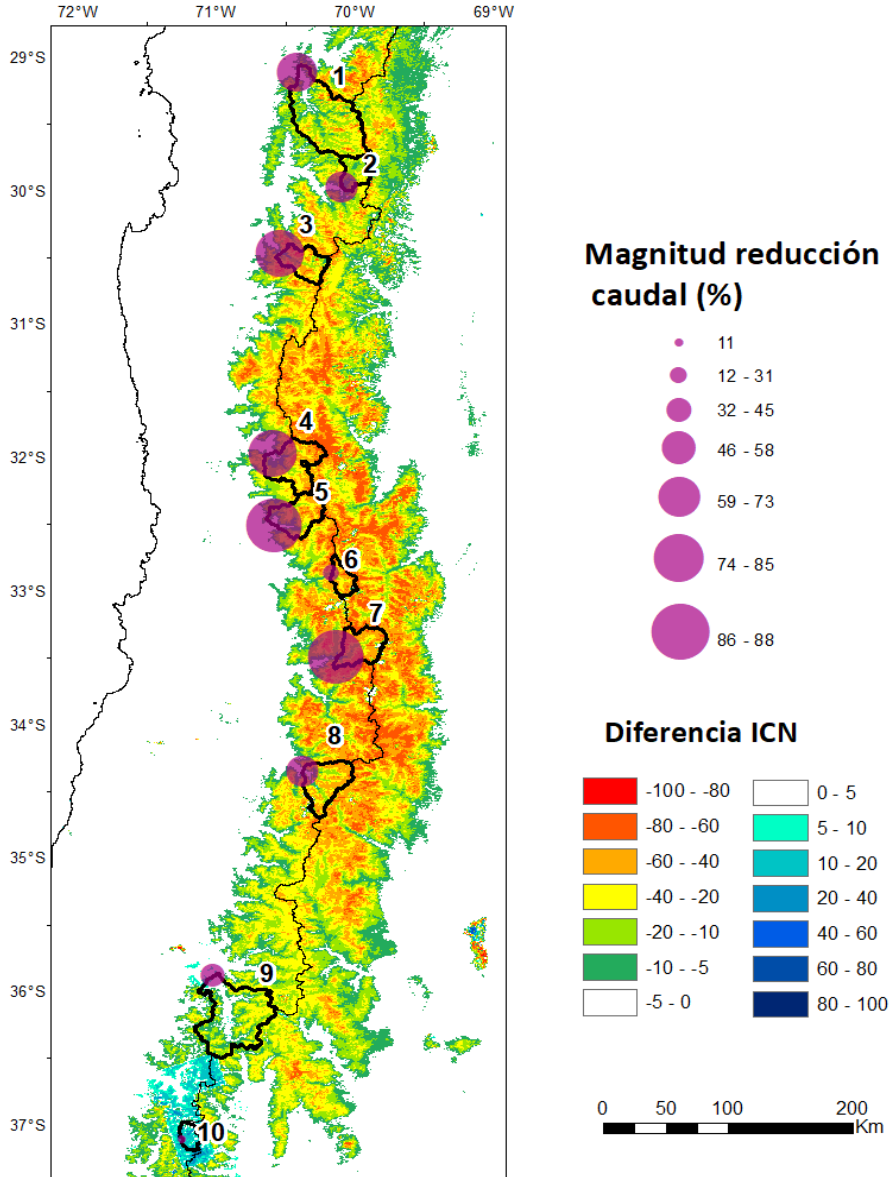
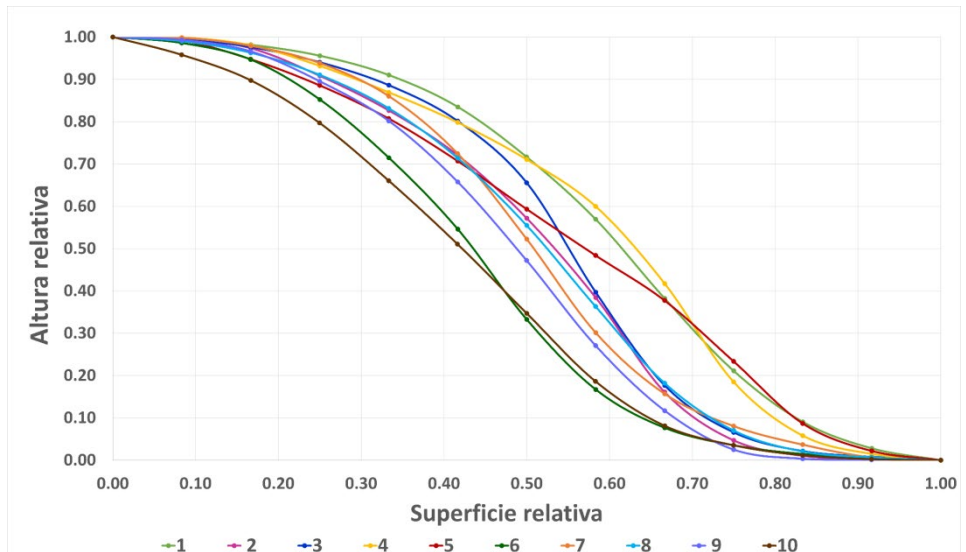


Figura 9. Diferencia ICN y caudal para el área de estudio años 2020-2000.

## 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-Garretton 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](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.