

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



ANÁLISIS DE SEQUÍA DE NIEVE CON DATOS DE REANÁLISIS
ATMOSFÉRICO ERA5-LAND EN LA MACROZONA CENTRO-SUR DE CHILE
PARA EL PERIODO 1990-2021.

NICOLÁS IGNACIO BUSTOS MELLA

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD
DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN-CHILE

2025

**ANÁLISIS DE SEQUÍA DE NIEVE CON DATOS DE REANÁLISIS
ATMOSFÉRICO ERA5-LAND EN LA MACROZONA CENTRO-SUR DE CHILE
PARA EL PERIODO 1990-2021.**

Aprobado por:

Sebastián Alberto Krogh Navarro
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Asociado

Profesor Guía

Eduardo Antonio Holzapfel Hoces
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Emérito

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Titular

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera
Ingeniera Civil, Ph. D.
Profesor Titular

Director del Departamento

Luis Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Titular

Decano

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Universidad de Concepción y a la Facultad de Ingeniería Agrícola por el ambiente académico y los recursos que hicieron posible esta investigación. Extiendo mi gratitud a la Dirección General de Aguas (DGA) y al Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) por los datos y estudios que facilitaron el avance de este proyecto.

Especial mención merece el profesor Sebastián Krogh, quien, además de guiarme académicamente, despertó en mí una pasión por la hidrología de montaña y la sequía de nieve. Su apoyo constante, tanto técnico como personal, y el acceso a publicaciones y clases especializadas enriquecieron significativamente mi desarrollo profesional.

Agradezco también al profesor Jerónimo Paredes por su dedicación en mi aprendizaje de Matlab y por la oportunidad de ser su ayudante en Cálculo Numérico, lo que fortaleció mis habilidades académicas y docentes.

Reconozco el valioso apoyo de mi hermano, Carlos Bustos, quien me asistió en la elaboración de códigos y gráficos, siendo un pilar técnico y personal durante este proceso.

Finalmente, gracias a todos los miembros de la Facultad de Ingeniería Agrícola, cuyo trabajo y dedicación contribuyeron a un entorno de excelencia que ha marcado profundamente mi formación académica.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a mi familia: a mis padres y hermano especialmente, quienes siempre han sido mi pilar, brindándome apoyo incondicional y palabras de aliento en cada momento. Su amor y fortaleza me han impulsado a alcanzar este logro.

A mi pareja, Ivanna, por ser mi compañera en cada paso de este camino, compartiendo alegrías y desafíos, y por darme siempre la fuerza para seguir adelante. A mi querido amigo Tapia, cuya lealtad y ánimo constante han sido un gran respaldo a lo largo de este proceso, recordándome siempre la importancia de la amistad verdadera.

Este trabajo también está dedicado a quienes me han acompañado desde el primer año de universidad: Pablo, Nachito, Tammy y por supuesto, mi cuñi (Mary), quienes han dejado una huella imborrable en mi vida. Su amistad ha sido un regalo invaluable en este recorrido.

Quiero dedicar un espacio especial a mi abuelita Leito. Aunque ya no estés físicamente, siento tu presencia desde el cielo, inspirándome y dándome fuerzas con cada paso. Este logro es para ti, por enseñarme el valor de la valentía y ser mi modelo por seguir.

Finalmente, a mis mascotas, que con su amor incondicional han llenado mis días de alegría. Tanto los que aún están conmigo como aquellos que ya partieron, siempre permanecerán en mi corazón como un ejemplo de amor puro y sincero.

ÍNDICE DE MATERIAS

Página

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. HIPÓTESIS	13
3. OBJETIVOS	13
3.1. Objetivo general	13
3.2. Objetivos específicos.....	13
4. ANTECEDENTES GENERALES	14
4.1. Caracterización por región y cuenca.....	16
4.1.1. Región Metropolitana de Santiago.....	16
4.1.2. Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI).....	18
4.1.3. Región del Maule (VII).....	20
4.1.4. Región del Ñuble (XVI).....	22
4.1.5. Región del Biobío (VIII)	24
4.2. Caracterización regional y de cuencas	26
5. METODOLOGÍA.....	32
5.1. Selección de cuencas y descarga de datos.....	32
5.1.1. Criterios de selección de cuencas.....	32
5.1.2. Fuentes y procesamiento de datos	33
5.2. Organización y procesamiento de datos.....	35
5.2.1. Delimitación y preprocesamiento espacial de datos grillados	35

5.2.2.	Organización y control de calidad preliminar	39
5.2.3.	Cálculo de variables clave.....	39
5.3.	Clasificación de tipo de sequias de nieve	41
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
6.1.	Resultados.....	43
6.1.1.	Análisis regional del EAN y caudales medios de deshielo	43
6.1.2.	Análisis de distribución de sequias de nieve.....	51
6.1.3.	Análisis temporal de sequías de nieve.....	54
6.1.4.	Análisis de tipo de sequía de nieve y caudales de deshielo.....	61
6.2.	Discusión	85
7.	CONCLUSIONES.....	88
8.	LITERATURA CITADA.....	90
9.	ANEXOS Y APENDICES	107

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Clasificación de regímenes hidrológicos de las cuencas en estudio, según altitud media.....	27
Tabla 2.	Atributos geomorfológicos de cuencas en estudio zona centro de Chile.....	28
Tabla 3.	Atributos hidroclimáticos medio anuales para las cuencas de estudio en la zona centro de Chile. Promedio anual representativo 1990-2020.	29
Tabla 4.	Atributos geomorfológicos de cuencas en estudio zona sur de Chile.	30
Tabla 5.	Atributos hidroclimáticos medio anuales para las cuencas de estudio en la zona sur de Chile. Promedio anual representativo 1990-2020.	31
Tabla 6.	Clasificación de rango de isoterma 0°C de las cuencas en estudio según su altitud media y zona geográfica. Elaboración propia.....	46
Tabla 7.	Frecuencia porcentual de clasificación climática por tipo de año hidrológico en cada cuenca (1990-2021).....	53
Tabla 8.	Frecuencia porcentual de clasificación climática por tipo, a nivel regional y de macrozona centro-sur en el año hidrológico (2020-2021).....	61
Tabla 9.	Factores geo climáticos de las regiones en estudio	107
Tabla 10.	Cuadro resumen de las cuencas analizadas zona centro	108
Tabla 11.	Cuadro resumen de las cuencas analizadas zona sur	109

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Esquema conceptual del sistema hídrico de montaña. Se ilustran los procesos dominantes en zona de alta pendiente: Precipitación en forma sólida y líquida, acumulación de nieve (SWE), derretimiento (M), almacenamiento en la zona de raíces (S).	6
Figura 2.	Clasificación conceptual de los tipos de sequía de nieve según la relación entre precipitación (P) y equivalente en agua de nieve (EAN). Se distinguen las sequías de nieve secas y cálidas. Además de otros estados hidrológicos del manto nival.	9
Figura 3.	Ubicación de las cuencas del área de estudio (Macrozona centro-sur de Chile), bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur, superpuesta en una capa de vista satelital Google Earth.	15
Figura 4.	Bounding box de descarga para la cuenca del río Volcán en Queltehues, bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur, superpuesta en una capa de vista satelital Google earth.	36
Figura 5.	Píxeles representativos cuenca río Volcán en Queltehues, bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur, superpuesta en una capa de vista satelital de Google earth.	38
Figura 6.	Relación entre peak anual EAN y caudal promedio de deshielo en cuencas de la zona centro (Regiones Metropolitana, O'Higgins y Maule), para el periodo 1990-2021.	44
Figura 7.	Relación entre peak anual de EAN y caudal promedio de deshielo en cuencas de la zona sur (Regiones de Ñuble y Biobío), para el periodo 1990-2021.	47
Figura 8.	Valor promedio del peak de equivalente en agua de nieve (EAN) por cuenca en el periodo 1990-2021.	49
Figura 9.	Comparación del caudal promedio anual por cuenca entre el año hidrológico completo (abril-marzo) y la temporada de deshielo (septiembre-marzo) para el periodo 1990-2021.	50

Figura 10.	Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región Metropolitana.....	55
Figura 11.	Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región de O'Higgins.....	56
Figura 12.	Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región del Maule.....	56
Figura 13.	Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región del Ñuble.	58
Figura 14.	Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región del Biobío.	58
Figura 15.	Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio para la macrozona centro-sur entre los años hidrológicos 1990-2020	60
Figura 16.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en Estero Yerba Loca (1990-2021).....	63
Figura 17.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en Río Mapocho en los Almendros.....	64
Figura 18.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Volcán en Queltehues.....	65
Figura 19.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Claro en hacienda Las Nieves.....	67
Figura 20.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Pangal en Pangal.....	68
Figura 21.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Tinguiririca en Bajo Briones.....	70
Figura 22.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Achibueno en La Recova.....	71
Figura 23.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Longaví en la Quiriquina.....	72
Figura 24.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Teno antes junta con Claro.....	74
Figura 25.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Diguillín en San Lorenzo.....	75
Figura 26.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Ñuble en San Fabián N°2.	77
Figura 27.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Renegado en Invernada.	78
Figura 28.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Duqueco en Villucura.....	80
Figura 29.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Rucue en camino a Antuco.....	81

Figura 30.	Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Lonquimay antes junta con Biobío.....	83
Figura 31.	Distribución porcentual de clasificación climática por cuenca durante el periodo 1990-2021	110

GLOSARIO

Albedo	Porcentaje de radiación solar reflejada por una superficie en comparación con la radiación que incide sobre ella. Es un parámetro clave en el estudio de la nieve y el hielo.
Arrastre	Transporte de partículas de nieve sobre la superficie por el viento, sin levantarse del suelo.
Año Hidrológico	Periodo que comienza el 1 de abril y finaliza el 31 de marzo. El cual permite capturar de manera más representativa el ciclo hidrológico, abarcando la temporada de acumulación de nieve y el deshielo de primavera y verano.
Caudal	Volumen de agua que fluye en un río o corriente en un tiempo determinado, expresado en metros cúbicos por segundo.
Capa de Nieve	Estrato de nieve que se acumula en la superficie durante la temporada fría, actuando como un reservorio de agua que se libera durante el deshielo.
C3S	Siglas del Servicio de Cambio Climático de Copernicus, encargado de proporcionar información climática pasada, presente y futura para el monitoreo y la adaptación al cambio climático.
Ciclo Hidrológico	Proceso continuo de circulación del agua en la Tierra, que incluye los procesos de evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía y flujo subterráneo, regulando la disponibilidad de recursos hídricos.
Cuenca Hidrográfica	Área geográfica donde toda el agua superficial converge hacia un único punto de salida, como un río.

EAN	Equivalente de agua líquida en la capa de nieve, representando el volumen de agua líquida que se obtendría si la nieve acumulada se fundiera completamente.
ECMWF	Siglas del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio, que proporciona datos climáticos y pronósticos a nivel global.
ERA5-Land	Conjunto de datos de reanálisis atmosférico del ECMWF para aplicaciones terrestres, con alta resolución espacial y temporal.
Escorrentía	Agua de lluvia o nieve que fluye sobre la superficie del terreno y se dirige hacia ríos y embalses.
Evapotranspiración	Pérdida de agua del suelo y plantas hacia la atmósfera, influenciada por temperatura y humedad.
Glaciar	Masa de hielo en movimiento que se acumula en zonas montañosas y actúa como un reservorio de agua.
Gradiente Orográfico	Aumento de la precipitación en áreas montañosas debido al ascenso de aire húmedo sobre las laderas.
Isoterma 0°C	Altitud donde la temperatura del aire es de 0°C, marcando la línea de separación aproximada entre precipitaciones líquidas y sólidas en la montaña.
Manto Nival	Volumen de nieve acumulada que cubre una superficie durante la temporada de invierno, actuando como un reservorio natural de agua.
Milímetro (mm)	Unidad de medida de precipitación que cuantifica la cantidad de agua caída en un área o superficie determinada en un período de tiempo, expresada en milímetros.

NetCDF	(Network Common Data Form) Formato de archivo para almacenar e intercambiar datos científicos multidimensionales, utilizado especialmente para datos espaciales y temporales en estudios climáticos y atmosféricos.
Pixel	Unidad mínima de una imagen digital, que representa un área en la matriz de la imagen y define su resolución.
Precipitación Nival	Tipo de precipitación en forma de nieve, que contribuye al manto nival.
Procesamiento de Datos	Conjunto de técnicas para la manipulación, análisis y visualización de datos con el fin de extraer información útil.
RCMs	Modelos Climáticos Regionales, son herramientas computacionales que simulan el clima a escala regional, estudiando el impacto en regiones específicas, permitiendo un análisis detallado de variables climáticas
Reanálisis Climático	Proceso que utiliza datos históricos y modelos numéricos para producir representaciones consistentes del clima a lo largo del tiempo.
Saltación	Proceso por el cual partículas de nieve son movidas en la superficie por ráfagas de viento sin mantenerse en suspensión.
Saturación de Vapor	Punto en el cual el aire contiene la máxima cantidad de vapor de agua posible a una temperatura dada.
Sequía de Nieve	Fenómeno en el cual la acumulación de nieve (medida como SWE) es menor al promedio histórico, afectando la disponibilidad de agua.
Sequía de Nieve Cálida	Tipo de sequía nival que ocurre cuando las temperaturas son altas y las precipitaciones son mayores, pero el manto nival es menor.

Sequía de Nieve Seca	Tipo de sequía nival caracterizada por bajas precipitaciones líquidas y de nieve, resultando en menor acumulación de nieve.
Sublimación	Proceso en el cual el hielo o la nieve se convierten directamente en vapor sin pasar por el estado líquido.
Suspensión Turbulenta	Forma de transporte de nieve por viento en la que los cristales de nieve son mantenidos en el aire

**ANALISIS DE SEQUÍA DE NIEVE CON DATOS DE REANALISIS
ATMOSFERICO ERA5-LAND EN LA MACROZONA CENTRO-SUR DE CHILE
PARA EL PERIODO 1990-2021.**

SNOW DROUGHT ANALYSIS WITH ERA5-LAND ATMOSPHERIC
REANALYSIS DATA IN THE SOUTH CENTRAL MACROZONE OF CHILE
DURING THE PERIOD 1990-2021

Palabras clave: Caudal de deshielo, EAN, manto nival, régimen nival, sequía de nieve.

RESUMEN

Esta investigación estudio las sequías de nieve y su relación con la disponibilidad hídrica en la macrozona centro-sur de Chile, analizando la variabilidad temporal y espacial del equivalente en agua de nieve (EAN) y su relación con los caudales estacionales entre 1990 y 2021. Utilizando datos del reanálisis ERA5-Land, complementados con registros nacionales y procesados en Python, se implementó una metodología de clasificación de años hidrológicos basada en los percentiles 50 del máximo equivalente en agua de la nieve y precipitación total. Los resultados evidencian una transición hidrológica post-2010, donde los años húmedos y nevados fueron reemplazados por eventos de sequías de nieve seca y cálida, especialmente en la zona central. Se identificó una diferenciación regional en donde las cuencas de la zona central muestran una alta dependencia del manto nival, evidencian un debilitamiento de la relación entre el peak EAN y el caudal en la última década. Por el contrario, la zona sur exhibe una mayor resiliencia a cambios del manto nival, donde el caudal se sostiene gracias a la precipitación líquida, evidenciando una transición hacia un régimen mayoritariamente pluvial en cuencas

de baja altitud. Este estudio permite comprender mejor la relación entre la acumulación y derretimiento de nieve y caudales, aportando información clave para la planificación hídrica y la gestión territorial.

**SNOW DROUGHT ANALYSIS WITH ERA5-LAND ATMOSPHERIC
REANALYSIS DATA IN THE SOUTH CENTRAL MACROZONE OF CHILE
DURING THE PERIOD 1990-2021.**

Keywords: Snowmelt, snow drought, streamflow, snowpack, SWE.

ABSTRACT

This research addresses the growing threat of snow drought to water security in the south-central macrozone of Chile, analyzing the temporal and spatial variability of snow water equivalent (SWE) and its relationship with seasonal streamflows between 1990 and 2021. Using data from the ERA5-Land reanalysis dataset, supplemented with national records, processed in Python automation tools, a methodology for classifying hydrological years was implemented based on the 50th percentiles of peak SWE and total precipitation. The results show a hydrological transition post-2010 h, where wet and snowy years were replaced by dry and warm snow drought events, especially in the central zone. The basins in the central zone show a high dependence on snow cover, evidencing a weakening of the relationship between SWE and streamflow over the last decade. Conversely, the southern zone exhibits greater resilience to changes in snowpack changes, where streamflow is sustained by rainfall, evidencing a transition to a predominantly pluvial regime in low-altitude basins. These findings provide a more in depth understanding of the effects of climate change on the mountain hydrological cycle and provide a technical basis for water planning and territorial management.

1. INTRODUCCIÓN

El agua, recurso natural insustituible, enfrenta una creciente escasez a nivel global. A finales del siglo XX, el consumo de agua potable ya superaba en más del doble la tasa de crecimiento demográfico mundial (FAO, 2013). Chile no ha sido ajeno a esta problemática, especialmente desde 2010 periodo durante el cual el país experimentó una de las sequías más severas de su historia registrada con déficits medios de lluvia de 25 - 45% (Garreaud et al., 2019), reflejándose directamente en una disminución significativa de los caudales. Balances hídricos recientes indican que los caudales superficiales en las macrocuencas de la zona centro-sur de Chile, como las de los ríos Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito y Maule, han experimentado mermas de entre un 13% y un 37% en los últimos 30 años (DGA, 2020). Estas cuencas son vitales, ya que abastecen a aproximadamente 11.6 millones de chilenos, lo que representa el 63% de la población nacional, proyección propia (basada en datos del Censo de Población y Vivienda [INE], 2024). La crisis hídrica en esta macrozona se ve exacerbada por la combinación de una oferta limitada y una demanda creciente, impulsada principalmente por el sector agrícola (73,8%), seguido del consumo humano (11,8%), industrial (6,7%), generación hidroeléctrica (4,5%) y minero (3,2%) estimación basada en el Atlas del agua, (2016).

El cambio climático global, caracterizado por ser generalizado, rápido e intenso, agrava este panorama. Informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) señalan cambios sin precedentes recientes en el sistema

climático, como el aumento del nivel del mar, la pérdida de permafrost y el retroceso acelerado de glaciares y campos de hielo. Se proyecta que la temperatura mundial promedio en los próximos 20 años alcanzará o superará un calentamiento de 1,5°C con respecto al periodo preindustrial 1850 - 1900 (IPCC, 2019), con un consecuente aumento de fenómenos meteorológicos extremos a escala regional. Estos cambios han alterado los patrones de precipitación a nivel global, con aumentos esperados en latitudes altas y disminuciones en regiones subtropicales, afectando directamente la situación socioambiental. Para Chile, las proyecciones indican un aumento de temperatura de entre 1°C y 2°C para el periodo intermedio 2040-2070 (CEPAL, 2012).

En este contexto, la Cordillera de los Andes, el principal rasgo geomorfológico de Chile, juega un papel hidrológico fundamental. Las precipitaciones suelen ser más intensas en la cordillera que en los valles adyacentes debido al efecto orográfico: las masas de aire húmedo se ven forzadas a ascender al encontrar la barrera montañosa, enfriándose hasta alcanzar el punto de saturación y provocando un incremento en la precipitación. En las zonas altas, esta precipitación ocurre predominantemente en forma de nieve. La distribución espacial de la nieve depende crucialmente de la elevación de la isoterma 0°C, por encima de la cual la precipitación tiende a ser sólida.

La nieve acumulada forma un manto nival el cual depende de diversas variables hidrológicas clave como lo son su contenido de frío, el albedo, y el agua líquida contenida, que permiten estimar su EAN. A diferencia de la precipitación líquida,

la nieve actúa como reservorio temporal, liberando agua gradualmente en el periodo de deshielo (primavera-verano). Este deshielo es crucial en la zona centro-sur de Chile, ya que coincide con periodos de alta demanda hídrica y escasa o nula precipitación. Este proceso fundamental del ciclo hidrológico de montaña se ilustra en la Figura 1, la cual permite visualizar las interacciones entre nieve, almacenamiento y escorrentía en sistemas montañosos.

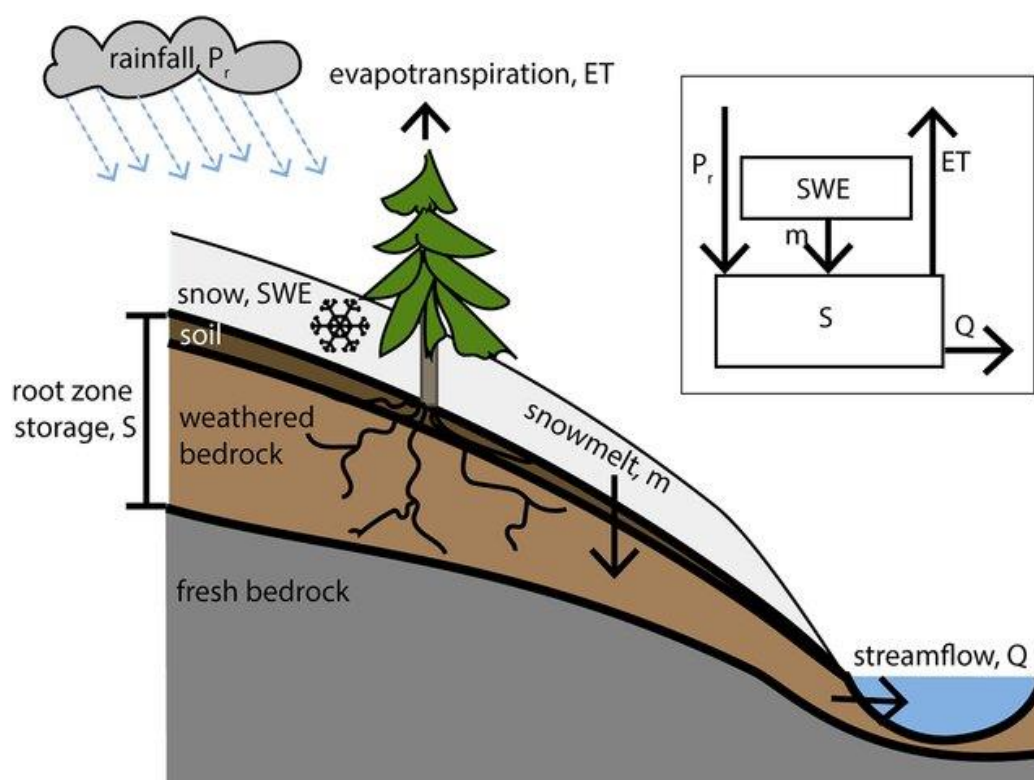


Figura 1. Esquema conceptual del sistema hídrico de montaña. Se ilustran los procesos dominantes en zona de alta pendiente: Precipitación en forma sólida y líquida, acumulación de nieve (SWE), derretimiento (M), almacenamiento en la zona de raíces (S), adaptado de Lapides et al. (2022).

La uniformidad del manto nival se ve afectada por factores como la vegetación, que intercepta la nieve impidiendo su acumulación directa sobre el suelo y

exponiéndola a sublimación, y el transporte eólico. El viento redistribuye la nieve y puede alterar la persistencia del manto mediante procesos de saltación, arrastre y suspensión turbulenta.

Reducciones en la cantidad de nieve acumulada, independientemente de la precipitación líquida, conducen a una inevitable disminución de la esorrentía fluvial. Por ejemplo, se prevé que en las cuencas de los Andes húmedos (en Chile y Argentina) los glaciares pierdan hasta 32% del escurrimiento entre 2030 y 2049 (Caro et al., 2025), coincidiendo con un aumento sustancial en la pérdida de masa de los glaciares. La disminución del recurso nival tiene profundas repercusiones ambientales, económicas y sociales, afectando ecosistemas de montaña, el turismo dependiente de la nieve, y la disponibilidad de agua para consumo humano, agricultura, industria y generación energética.

Históricamente, las sequías se han definido en función del déficit de precipitaciones (sequía meteorológica) o de caudales fluviales (sequía hidrológica). Estos fenómenos se han intensificado por el aumento de temperaturas, cambios en los patrones de precipitación y eventos meteorológicos extremos, impulsados por el calentamiento global y la variabilidad interanual. En este marco, ha surgido el concepto de "sequía de nieve", referida a un periodo en el cual la acumulación máxima de nieve (peak EAN) se encuentra por debajo del promedio histórico (Harpold et al., 2017).

Las sequías de nieve se clasifican en:

- **Sequías de nieve cálidas:** Ocurren cuando la precipitación total supera el promedio anual, pero las temperaturas elevadas resultan en una menor

acumulación de nieve (peak EAN inferior al promedio), debido a una mayor proporción de lluvia o derretimiento intermitente durante el periodo de acumulación.

- **Sequías de nieve secas:** Se caracterizan por una precipitación y un manto nival por debajo del promedio histórico, originadas por un déficit de precipitación sólida.

Estos dos tipos fundamentales de sequía de nieve se distinguen conceptualmente según la relación entre la precipitación total y el equivalente en agua de nieve (EAN), tal como se ilustra en la Figura 2.

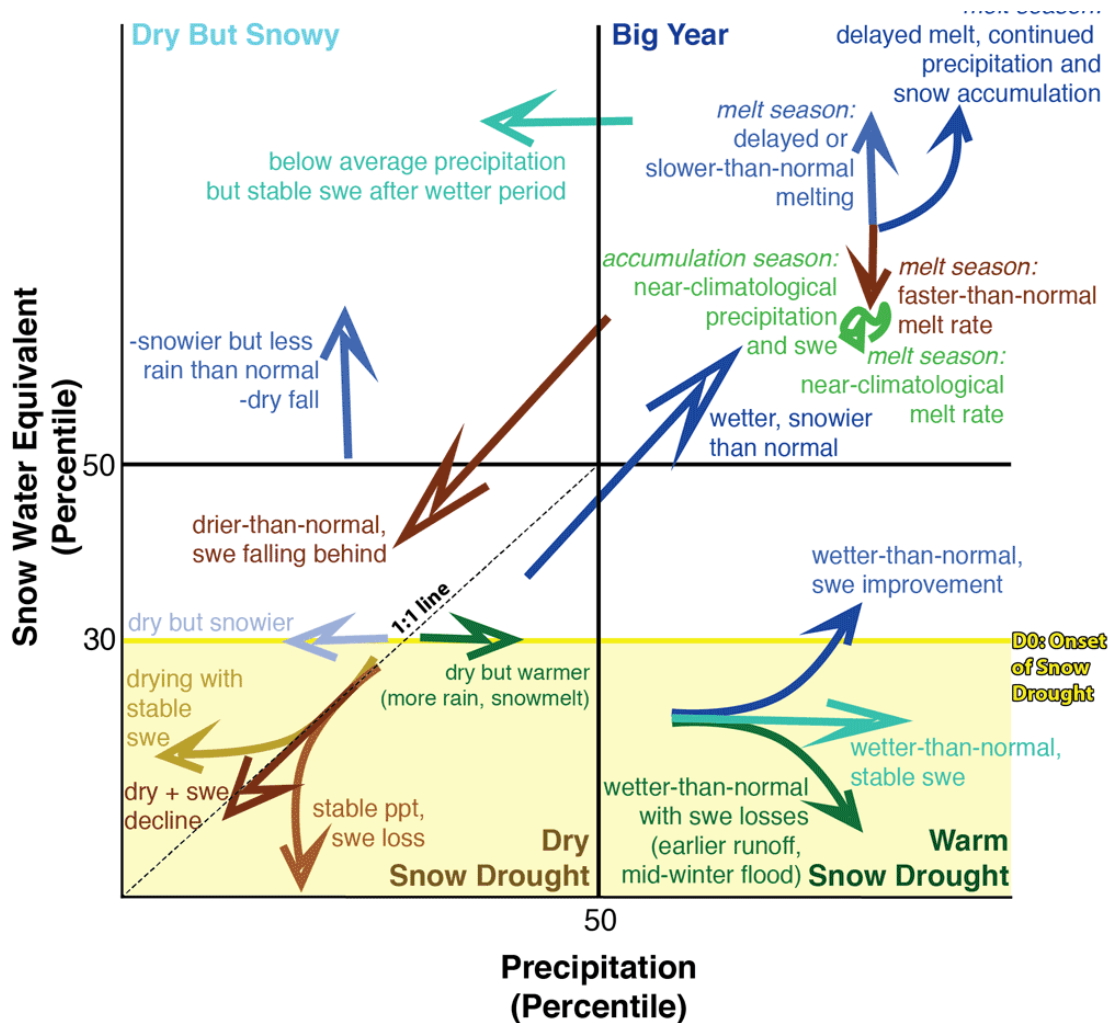


Figura 2. Clasificación conceptual de los tipos de sequía de nieve según la relación entre precipitación (P) y equivalente en agua de nieve (EAN). Se distinguen las sequías de nieve secas y cálidas. Además de otros estados hidrológicos del manto nival. Adaptado de Hatchett et al. (2022).

Los modelos climáticos sugieren una transición global desde sequías de nieve predominantemente secas hacia sequías cada vez más cálidas como consecuencia del calentamiento regional. La macrozona centro-sur de Chile enfrenta desafíos significativos debido a este fenómeno, ya que estas regiones

montañosas actúan como reservorios hídricos esenciales. La vulnerabilidad de esta zona se acentúa por la influencia de variaciones climáticas y factores antropogénicos (Garreaud et al., 2019), incluyendo el cambio climático y el uso intensivo de recursos naturales, con repercusiones directas en ecosistemas y actividades socioeconómicas.

Diversos estudios científicos, muchos de ellos fundamentados en el uso de reanálisis climáticos (modelos numéricos que combinan observaciones pasadas con modelos físicos para generar series de tiempo consistentes de variables atmosféricas), demuestran que el cambio climático está agudizando la disminución de la acumulación de nieve en la Cordillera de los Andes (Boisier et al., 2018; Masiokas et al., 2020; Caro et al., 2024; Vásquez et al., 2025). Proyecciones para los Andes centrales indican una disminución significativa en la acumulación nival en las próximas décadas, con una posible reducción de hasta un 30% en la acumulación de nieve en la zona centro-sur de Chile para fines del siglo XXI (Vásquez et al., 2025), dependiendo de los escenarios de emisiones. El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) ha corroborado estas tendencias en su informe a las naciones “Seguridad hídrica en Chile: Caracterización y perspectivas de futuro”, observando una reducción en las nevadas y en la extensión de la capa de nieve en Chile central, lo que limita la disponibilidad de agua en primavera y verano (Alvarez-Garretón et al., 2023). Las principales preocupaciones en este contexto de déficit nival, acrecentadas por el cambio climático, incluyen el ascenso de la isoterma 0°C que transforma precipitación nival en lluvia, reduciendo la acumulación; un derretimiento nival

más temprano y rápido debido al aumento de temperaturas, lo que modifica la oferta hídrica con los periodos de mayor demanda; la reducción generalizada de la cobertura de nieve y el retroceso glaciar; y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos que impactan la acumulación estacional. Particularmente, la disminución sostenida de las precipitaciones en la zona de estudio facilita la formación de sequías de nieve, tanto secas como cálidas. A pesar de la reconocida importancia de la nieve como reservorio hídrico estratégico, y de la necesidad de diferenciar los tipos de sequías de nieve, existe una comprensión limitada sobre su variabilidad temporal y espacial detallada en la macrozona centro-sur de Chile durante las últimas décadas. Asimismo, el impacto diferencial que los distintos tipos de sequía de nieve (cálida versus seca) pueden ejercer sobre la magnitud y temporalidad de los caudales de deshielo en primavera y verano no ha sido suficientemente estudiado en la región. Esta falta de conocimiento dificulta la evaluación precisa de los riesgos y la planificación de medidas de adaptación efectivas, para sectores críticos como el consumo humano y la agricultura, altamente dependientes de la escorrentía nival.

Este proceso compromete la acumulación de nieve en zonas altas y reduce la capacidad de regulación natural del caudal en primavera-verano. Comprender la variabilidad espacio-temporal de las sequías de nieve, así como el impacto diferencial de sus distintos tipos sobre la escorrentía de deshielo durante los periodos clave de primavera-verano, constituye una brecha de conocimiento fundamental. Abordar esta brecha es crucial no solo para avanzar en la

hidrología de montaña, sino también para fundamentar el desarrollo de estrategias de adaptación que permitan mitigar los efectos adversos, sectores importantes que dependen directamente de este recurso cada vez más escaso. La presente investigación se adentra en esta problemática, buscando aportar claridad y herramientas para la toma de decisiones en un contexto de creciente incertidumbre climática, mediante una comprensión detallada de la variabilidad espacio-temporal y el impacto diferencial de los tipos de sequía de nieve en la zona centro-sur de Chile.

2. HIPÓTESIS

Los caudales de deshielo en la macrozona centro-sur de Chile no solo se relacionan con la cantidad de precipitación invernal sino también con la cantidad de nieve acumulada en la cordillera, lo cual se puede clasificar con una clasificación basada en el análisis de sequías de nieve.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Analizar las sequías de nieve históricas en la macrozona centro-sur del país, y evaluar su impacto en la generación de escorrentía.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar la variabilidad temporal y espacial de las sequías de nieve en la macrozona centro-sur de Chile durante el periodo 1990-2021.
- Evaluar si existe una relación entre el tipo de sequía de nieve y los caudales de primavera-verano de la zona centro-sur de Chile.

4. ANTECEDENTES GENERALES

La zona de estudio abarca la macrozona centro-sur de Chile, la cual depende críticamente de la criósfera andina para su abastecimiento hídrico, donde la acumulación de nieve regula los caudales fluviales de primavera y verano, esenciales para la agricultura, el consumo humano y la generación hidroeléctrica. La ubicación de las cuencas analizadas en este estudio se presenta en la Figura 3, la cual abarca desde la cuenca del Estero Yerba Loca antes de junta con San Francisco en el norte hasta la cuenca del Río Lonquimay antes de junta con el Río Biobío en el sur.

La caracterización de las cuencas hidrográficas detalla sus atributos geomorfológicos e hidroclimáticos. Esta descripción ahondará en sus particularidades geográficas y climáticas, en relación con el recurso hídrico y la acumulación de nieve.

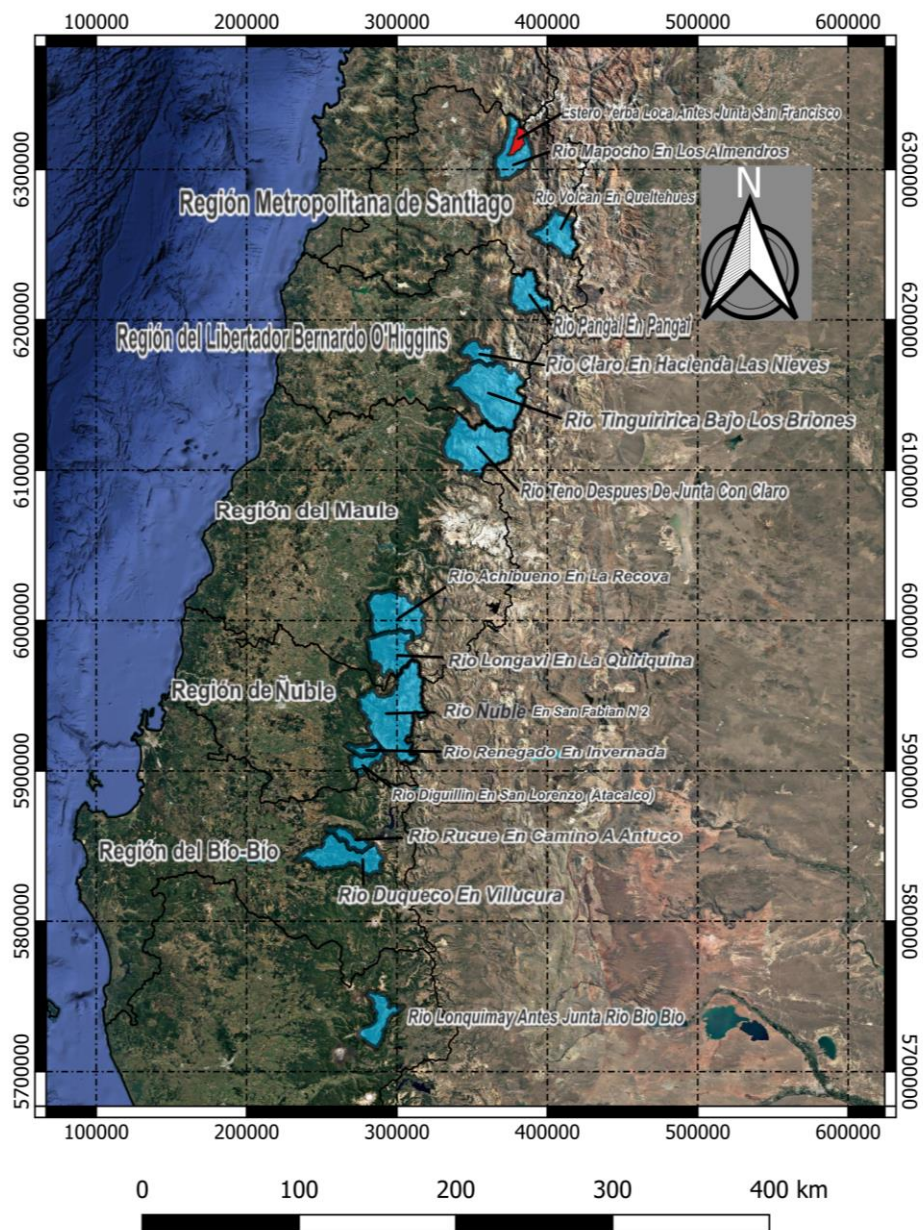


Figura 3. Ubicación de las cuencas del área de estudio (Macrozona centro-sur de Chile), bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur. La delimitación de las cuencas fue extraída desde CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018) superpuesta en una capa de vista satelital Google Earth.

4.1. Caracterización por región y cuenca

La selección de estas quince cuencas distribuidas en las regiones Metropolitana, O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío, responde a su relevancia hidroclimática en el contexto de la sequía de nieve, su régimen de alimentación predominantemente nivo-glacial, nival, mixto (pluvio-nival) o pluvial caracterizada en la Tabla 1 y su importancia para el abastecimiento hídrico.

4.1.1. Región Metropolitana de Santiago

La región Metropolitana de Santiago (RM) constituye la zona más densamente poblada de Chile (INE, 2024) y concentra gran parte de la actividad económica nacional. Su seguridad hídrica depende en gran medida de los aportes provenientes de la alta cordillera andina, particularmente a través de la cuenca del río Maipo.

4.1.1.1. Cuenca del Estero Yerba Loca antes Junta con San Francisco

Ubicada en el sector nororiental de la RM, en la comuna de Lo Barnechea, esta cuenca corresponde a una unidad de cabecera del río Maipo alto. Posee una superficie de 110 km², una pendiente media del 29,5%, una elevación media de 3.424 m s.n.m., una precipitación media anual de 500 mm y un caudal medio anual de 0.9 m³ s⁻¹. Según su altitud media, que supera los 3.400 m s.n.m., presenta un régimen nival-glaciar, caracterizado por la dominancia del deshielo prolongado de nieve y glaciares (Baez-Villanueva et al., 2024). La cuenca registra temperaturas frías, con un promedio anual de 3,3°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), y muestra una marcada estacionalidad hidrológica. La combinación de su morfología abrupta, escasa cobertura vegetal y rol como zona de

acumulación nival la convierte en un sitio clave para el estudio de la dinámica hídrica frente a condiciones de sequía de nieve.

4.1.1.2. Cuenca del río Mapocho en Los Almendros

Situada en el sector central andino de la región Metropolitana, esta cuenca forma parte del sistema alto andino del río Maipo. Presenta una superficie de 638 km², una pendiente media del 25,2%, una altitud media aproximada de 2.779 m s.n.m., una precipitación media anual de 501 mm y un caudal medio anual de 4,9 m³ s⁻¹. Esto le confiere un régimen Nival, según la clasificación hidrológica basada en altitud representada en la Tabla 1. Las condiciones térmicas son frías, con una temperatura media anual de 6,7°C (Álvarez-Garretón et al., 2018). Esta cuenca se distingue por su alta sensibilidad a las fluctuaciones de nieve almacenada, y su aporte resulta fundamental para la recarga del río Mapocho, recurso vital para el abastecimiento urbano. Por ello, constituye un sitio estratégico para el monitoreo de sequías de origen nival.

4.1.1.3. Cuenca del río Volcán en Queltehues

Localizada en la alta cordillera de la comuna de San José de Maipo, esta cuenca posee una superficie de 523,4 km², una pendiente media del 27,9%, una altitud media de 3.367 m s.n.m. una precipitación media anual de 899 mm y un caudal medio anual de 6,2 m³ s⁻¹. Presenta un régimen Nival-glaciar, dominado por la acumulación y fusión de nieve, conforme a su altitud y características morfoclimáticas. La temperatura media anual alcanza los 3,9°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), lo que refuerza su carácter de zona nival. Su importancia radica en su rol como reservorio de agua sólida, que alimenta de forma

significativa al río Maipo durante el período de deshielo, siendo esencial para la evaluación del impacto de las sequías nivales en la disponibilidad hídrica regional.

4.1.2. Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI)

La región de O'Higgins se caracteriza por una importante actividad agrícola, especialmente en los valles, lo que genera una alta demanda hídrica. Sus sistemas fluviales dependen en gran medida de los aportes cordilleranos, haciendo que la acumulación nival sea crucial para la disponibilidad de agua durante la temporada seca.

4.1.2.1. Cuenca del río Claro en Hacienda Las Nieves

La cuenca del río Claro en Hacienda Las Nieves, localizada en el sector cordillerano de la región de O'Higgins, representa una unidad hidrográfica de alta montaña. Posee una superficie de 245 km², una pendiente media del 28,5%, una altitud media de 2.078 m s.n.m., una precipitación media anual de 1.536 mm y un caudal medio anual de 7,7 m³ s⁻¹. Presenta una temperatura media anual de 9,1°C (Álvarez-Garretón et al., 2018). Su régimen es Pluvio-nival, dependiendo fuertemente del almacenamiento de nieve invernal (Baez-Villanueva et al., 2024) y la escorrentía primaveral, siendo estratégica para el abastecimiento de riego y consumo humano en temporadas secas. La escasa cobertura vegetal y su topografía compleja la vuelven particularmente sensible a variaciones en la acumulación nival, lo que subraya su importancia en el estudio de sequías de nieve.

4.1.2.2. Cuenca del río Pangal en Pangal

La cuenca del río Pangal en Pangal se encuentra en el sector cordillerano de la región de O'Higgins. Posee una superficie de 519.9 km², una pendiente media del 29,9%, una altitud media de 3.071 m s.n.m., una precipitación media anual de 1.350 mm y un caudal medio anual de 14,3 m³ s⁻¹. Presenta una temperatura media anual de 4,9°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), y un régimen Nival, dependiendo del almacenamiento de nieve invernal (Baez-Villanueva et al., 2024). Se caracteriza por su fuerte estacionalidad, con acumulación de nieve en invierno y escorrentía concentrada en primavera-verano. La zona es de especial interés por su rol en el aporte hídrico a la cuenca del Cachapoal, la cual es clave para el riego agrícola y la producción hidroeléctrica regional. Esta cuenca sirve como un indicador fundamental de los efectos de las sequías nivales en los sistemas de alta dependencia nival.

4.1.2.3. Cuenca del río Tinguiririca en Bajo Briones

La cuenca del río Tinguiririca en Bajo Briones se sitúa en la precordillera de la región de O'Higgins, destacando por su uso intensivo para riego agrícola y generación hidroeléctrica. Posee una superficie de 1.438,3 km², una pendiente media del 27,1%, una altitud media de 2.550 m s.n.m., una precipitación media anual de 1.536 mm y un caudal medio anual de 47,5 m³ s⁻¹. Presenta una temperatura media anual de 6,5°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), y un régimen mayormente Nival (Baez-Villanueva et al., 2024). Esta cuenca es particularmente representativa de la vulnerabilidad hídrica en zonas intermedias, donde la transición entre climas mediterráneos y templados

modula fuertemente la disponibilidad de agua, lo que la convierte en un punto clave para analizar los impactos de la sequía de nieve en un contexto de demanda intensiva.

4.1.3. Región del Maule (VII)

La región del Maule es una de las principales zonas agrícolas del país, lo que la hace altamente dependiente de los recursos hídricos para riego. La contribución nival de los Andes es fundamental para sostener sus actividades productivas y el consumo humano, especialmente durante los meses de menor precipitación.

4.1.3.1. Cuenca del río Achibueno en La Recova

Ubicada en la zona precordillerana de la región del Maule, la cuenca del río Achibueno en La Recova constituye una unidad hidrográfica clave por su aporte de nieve al sistema fluvial regional. Posee una superficie de 894.3 km², una pendiente media del 24,9%, una altitud media de 1.329 m s.n.m., una precipitación media anual de 1.946 mm y un caudal medio anual de 39,8 m³ s⁻¹. Con una temperatura media anual de 10,1°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), presenta un régimen mayoritariamente Pluvial (Baez-Villanueva et al., 2024), aunque la acumulación de nieve durante el invierno en zonas altas juega un rol fundamental en la disponibilidad hídrica de primavera-verano. Esta cuenca abastece actividades agrícolas, de conservación ecológica y generación hidroeléctrica, siendo además reconocida por su biodiversidad y valor ambiental. Su localización en el margen oriental de la región la expone a una

alta sensibilidad frente a cambios en la isoterma 0°C y a fenómenos climáticos extremos.

4.1.3.2. Cuenca del río Longaví en La Quiriquina

La cuenca del río Longaví en La Quiriquina, ubicada en el sector cordillerano de la región del Maule, posee una superficie de 668,3 km², una pendiente media del 24,7%, una altitud media de 1.401 m s.n.m., una precipitación media anual de 1.976 mm y un caudal medio anual de 40,8 m³ s⁻¹. Presenta una temperatura media anual de 9,3°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), y un régimen Pluvio-nival (Baez-Villanueva et al., 2024) basada en la Tabla 1. Se caracteriza por ser una cuenca vulnerable a las variaciones del ciclo hidrológico. Su importancia radica en el abastecimiento de agua para riego agrícola en el valle central, donde se desarrollan cultivos de alto valor económico. La escorrentía de primavera-verano depende fuertemente del almacenamiento nival, por lo que su monitoreo resulta clave para la gestión hídrica en un contexto de sequía.

4.1.3.3. Cuenca del río Teno antes de Junta con Claro

La cuenca del río Teno antes de su junta con el río Claro, ubicada en la región del Maule, constituye una unidad hidrográfica clave para el suministro de agua en la zona central de Chile. Posee una superficie de 1.205,3 km², una pendiente media del 26,6%, una altitud media de 2.090 m s.n.m., una precipitación media anual de 1.655 mm y un caudal medio anual de 49,7 m³ s⁻¹. Se caracteriza por una orografía pronunciada y una altitud variable que favorece la acumulación de nieve durante el invierno, configurando un régimen Pluvio-nival (Baez-Villanueva et al., 2024), fundamental para la generación de caudales en

primavera-verano. Con una temperatura media anual de 7,9°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), la sensibilidad de esta cuenca a variaciones climáticas, especialmente a cambios en la temperatura y la distribución de precipitaciones, la posiciona como un indicador crítico de la respuesta hidrológica frente a la mega sequía en curso. Este análisis resulta esencial para comprender el comportamiento del ciclo hidrológico en montaña en condiciones de estrés hídrico.

4.1.4. Región del Ñuble (XVI)

La región de Ñuble, creada en 2018, presenta una matriz productiva predominantemente agrícola y forestal, con una creciente demanda hídrica. La variabilidad climática, sumada a la menor acumulación de nieve en la cordillera, ha puesto en evidencia la vulnerabilidad de sus recursos hídricos, haciendo esencial el monitoreo de sus cuencas andinas y precordilleranas.

4.1.4.1. Cuenca del río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)

La cuenca del río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco) se encuentra en la zona precordillerana de la región de Ñuble, dentro de la comuna de Pinto. Posee una superficie de 204,4 km², una pendiente media del 24,4%, una altitud media de 1.511 m s.n.m., una precipitación media anual de 2.400 mm y un caudal medio anual de 14,6 m³ s⁻¹. Presenta un régimen Pluvio-nival (Baez-Villanueva et al., 2024), con fuerte influencia nival especialmente durante los meses invernales. Su temperatura media anual es de 8.4°C. Esta cuenca destaca por su importancia en la provisión de agua para uso agrícola y ecosistémico, siendo especialmente vulnerable a la disminución de acumulación de nieve derivada

de inviernos secos o más cálidos. Su monitoreo es clave para evaluar la evolución del balance hídrico en un contexto de cambio climático.

4.1.4.2. Cuenca del río Ñuble en San Fabián N°2

La cuenca del río Ñuble en San Fabián N°2 se localiza en la precordillera de la región de Ñuble, y posee una superficie de 1.645,6 km², una pendiente media del 24,3%, una altitud media de 1.601 m s.n.m., una precipitación media anual de 1.994 mm y un caudal medio anual de 90,9 m³ s⁻¹. Es representativa de un régimen Pluvio-nival. Con una temperatura media anual de 8,3°C, es sensible a cambios en la isoterma 0°C y a la disminución del manto nival. Su ubicación la convierte en una unidad clave para evaluar la transición entre la zona central y sur del país, particularmente en contextos de aumento térmico y disminución de nieve (Baez-Villanueva et al., 2024), que podrían afectar la escorrentía estacional y la disponibilidad hídrica para riego y abastecimiento humano.

4.1.4.3. Cuenca del río Renegado en Invernada

La cuenca del río Renegado, ubicada en el sector cordillerano de la comuna de Pinto, región de Ñuble, posee una superficie de 128,6 km², una pendiente media del 17,8%, una altitud media de 1.614 m s.n.m., una precipitación media anual de 2.533 mm y un caudal medio anual de 2,9 m³s⁻¹. Presenta un régimen Pluvio-nival, con fuerte influencia de la acumulación de nieve invernal. La temperatura media anual es de 7,9°C, y su entorno presenta escasa cobertura boscosa, lo que incrementa su sensibilidad a las fluctuaciones de la cobertura de nieve. Esta cuenca abastece de agua sectores agrícolas de la precordillera y comunidades rurales, por lo que su comportamiento hidrológico tiene un impacto directo en la

seguridad hídrica local, especialmente en periodos de transición climática y eventos extremos.

4.1.5. Región del Biobío (VIII)

La región del Biobío, una de las más extensas del centro-sur de Chile, se caracteriza por una importante actividad agrícola, forestal e hidroeléctrica. Sus sistemas fluviales andinos y precordilleranos, alimentados por la nieve y las lluvias, son fundamentales para sostener su desarrollo económico y social, por lo tanto, su vulnerabilidad a las sequías es un tema de creciente preocupación.

4.1.5.1. Cuenca del río Duqueco en Villucura

La cuenca del río Duqueco, ubicada en el sector andino-precordillerano de la región del Biobío, posee una superficie de 817,7 km², una pendiente media del 18,7%, una altitud media de 1.023 m s.n.m., una precipitación media anual de 2.029 mm y un caudal medio anual de 47 m³ s⁻¹. Esta cuenca se caracteriza por un régimen Pluvial, con aportes significativos de nieve durante el invierno y escorrentía derivada del deshielo en primavera-verano. La estación en Villucura presenta una temperatura media anual de 9.8°C (Álvarez-Garretón et al., 2018). Su configuración geográfica y climática la vuelve especialmente sensible a las variaciones en la acumulación nival, lo que incide directamente en la disponibilidad de agua para generación hidroeléctrica, agricultura y abastecimiento en periodos de alta demanda hídrica.

4.1.5.2. Cuenca del río Lonquimay antes Junta con río Biobío

La cuenca del río Lonquimay se localiza en el sector cordillerano de la región del Biobío, cercana a la frontera con Argentina y en las inmediaciones del volcán

Lonquimay. Posee una superficie de 466,7 km², una pendiente media del 17,1%, una altitud media de 1.359 m s.n.m., una precipitación media anual de 2.390 mm y un caudal medio anual de 26,2 m³ s⁻¹. Presenta una temperatura media anual de 7,2°C (Álvarez-Garretón et al., 2018), figurando un régimen Pluvio-nival predominante, con acumulación invernal y escurrimiento en primavera-verano. Esta cuenca posee baja cobertura vegetal y elevada pendiente, lo que la convierte en una unidad sensible frente a cambios en el almacenamiento de nieve. Su comportamiento hidrológico resulta clave para comprender el efecto del cambio climático en zonas altas del sur andino, donde las reservas de nieve son fundamentales para la regulación estacional del recurso hídrico.

4.1.5.3. Cuenca del río Rucue en camino a Antuco

La cuenca del río Rucue se encuentra en la región del Biobío, en las cercanías del Parque Nacional Laguna del Laja, específicamente en el sector camino a Antuco. Posee una superficie de 210,9 km², una pendiente media del 23.7%, una altitud media de 1.214 m s.n.m., una precipitación media anual de 2089 mm y un caudal medio anual de 14,9 m³ s⁻¹. Posee un régimen Pluvial (Baez-Villanueva et al., 2024) predominante de acuerdo con la Tabla 1, con temperaturas anuales que bordean los 9,2°C (Álvarez-Garretón et al., 2018). Esta ubicación le confiere un carácter intermedio entre cuenca andina y precordillerana. Su importancia radica en el aporte que realiza al sistema hidroeléctrico regional y a la recarga de acuíferos. Las condiciones topográficas y climáticas la hacen especialmente sensible a variaciones en el

almacenamiento hídrico, lo que motiva su inclusión en este análisis de la sequía de nieve.

4.2. Caracterización regional y de cuencas

Para complementar la descripción detallada de las cuencas y regiones es necesario sintetizar las principales características geográficas, climáticas e hidrológicas que definen el área de estudio. La Tabla 1, clasifica el régimen hidrológico de las cuencas, mientras que la Tabla 2 y Tabla 3 presentan un resumen de las características geomorfológicas, hidrológicas e hidroclimáticas clave de las regiones de la zona centro, ofreciendo un marco contextual más amplio. De forma complementaria, la Tabla 4 y la Tabla 5 ofrecen una visión consolidada de las propiedades clave para cada cuenca correspondiente a la zona sur. Estas tablas incluyen datos clave como la superficie, pendiente media, elevación media, precipitación media anual y caudal medio anual. Además, se incorpora la clasificación del régimen hidrológico basada en la altitud media de cada cuenca (Baez-Villanueva et al., 2024; Riffo et al., 2017; Dirección General de Aguas, 1987, 2014). Para asegurar la trazabilidad de la información, se ha incorporado el código BNA de cada cuenca y se referencia la fuente de los datos del proyecto CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2018).

Tabla 1. Clasificación de regímenes hidrológicos de las cuencas en estudio según altitud media, basada en (Baez-Villanueva et al., 2024; Riffo et al., 2017 y Dirección general de aguas, 1987, 2014).

Tipo de régimen	Altitud media (m s.n.m.)	Descripción principal
Pluvial	< 1300	Dominado por precipitaciones líquidas; máximos en invierno, bajo aporte nival.
Pluvio-nival	1300–2200	Influencia combinada de lluvias y nieve; máximos en invierno y primavera.
Nival	2200–3200	Dominado por acumulación y fusión de nieve; máximos en primavera-verano.
Nival-glaciar	> 3200	Dominado por nieve y glaciares; caudales sostenidos por deshielo prolongado.

Tabla 2. Atributos geomorfológicos de cuencas en estudio zona centro de Chile (Alvarez-Garreton et al., 2018).

Cuenca	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Área aportante (km ²)	Elevación media (m s.n.m.)	Pendiente media (%)
Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	33° 20' 36"	70° 21' 38"	110	3.424	29,5
Río Mapocho en Los Almendros	33° 22' 15"	70° 27' 3"	638	2.779	25,2
Río Volcán en Queltehues	33° 48' 34"	70° 12' 38"	523,4	3.367	27,9
Río Claro en hacienda Las Nieves	34° 29' 47"	70° 42' 8"	245	2.078	28,5
Río Pangal en Pangal	34° 14' 48"	70° 19' 43"	519,9	3.071	29,9
Río Tinguiririca en bajo los Briones	34° 43' 6"	70° 49' 37"	1.438,3	2.550	27,1
Río Achibueno en la Recova	36° 0' 10"	71° 26' 38"	894,3	1.329	24,9
Río Longaví en la Quiriquina	36° 13' 46"	71° 27' 24"	668,3	1.401	24,7
Río Teno después de junta con Claro	34° 59' 48"	70° 49' 16"	1.205,3	2.090	26,6

Tabla 3. Atributos hidroclimáticos medio anuales para las cuencas de estudio en la zona centro de Chile. Basado en CAMELS (Alvarez-Garreton et al., 2018). Promedio anual representativo 1990-2020.

Cuenca	Código BNA	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media (°C)	Caudal medio anual (m ³ s ⁻¹)
Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	5721001	500	3,3	0,9
Río Mapocho en Los Almendros	5722002	501	6,7	4,9
Río Volcán en Queltehues	5702001	899	3,9	6,2
Río Claro en hacienda las nieves	6013001	1.536	9,1	7,7
Río Pangal en Pangal	6006001	1.350	4,9	14,3
Río Tinguiririca en bajo los Briones	6028001	1.536	6,5	47,5
Río Achibueno en la recova	7354002	1.946	10,1	39,8
Río Longaví en la Quiriquina	7350001	1.976	9,3	40,8
Río Teno después de junta con Claro	7104002	1.655	7,9	49,7

Tabla 4. Atributos geomorfológicos de cuencas en estudio zona sur de Chile (Alvarez-Garreton et al., 2018).

Cuenca	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Área aportante (km ²)	Elevación media (m s.n.m.)	Pendiente media (%)
Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)	36° 55' 30"	71° 34' 32"	204,4	1.511	24,4
Río Ñuble en San Fabian n°2	36° 35' 12"	71° 31' 31"	1.645,6	1.601	24,3
Río Renegado en invernada	36° 51' 49"	71° 37' 47"	128,6	1.614	17,8
Río Duqueco en Villucura	37° 33' 7"	72° 1' 53"	817,7	1.023	18,7
Río Lonquimay antes junta con río Biobío	38° 26' 8"	71° 13' 57"	466,7	1.359	17,1
Río Rucue en camino a Antuco	37° 20' 30"	71° 47' 49"	210,9	1.214	23,7

Tabla 5. Atributos hidroclimáticos medio anuales para las cuencas de estudio en la zona sur de Chile. Basado en CAMELS (Alvarez-Garretón et al., 2018). Promedio anual representativo 1990-2020.

Cuenca	Código BNA	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media (°C)	Caudal medio anual (m ³ s ⁻¹)
Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)	8130002	2.400	8,4	14,6
Río Ñuble en San Fabian n°2	8106002	1.994	8,3	90,9
Río Renegado en invernada	8130001	2.533	7,9	2,9
Río Duqueco en Villucura	8323002	2.029	9,8	47
Río Lonquimay antes junta con río Biobío	8304001	2.390	7,2	26,2
Río Rucue en camino a Antuco	8376001	2.089	9,2	14,9

5. METODOLOGÍA

Este estudio se enfoca en el análisis de las sequías de nieve históricas en la macrozona centro-sur de Chile. Para superar las limitaciones de cobertura y continuidad de los registros in situ de caudal, EAN y precipitación total, se integraron series de EAN de reanálisis atmosféricos ERA5-Land y bases hidrométricas nacionales CAMELS, basadas en observación de la DGA. Esto permitió una representación continua y espacialmente completa del comportamiento nival e hidrológico de la cuencas de estudio.

La identificación de eventos de sequía de nieve se realizó utilizando como variables principales el peak anual del EAN y la precipitación total durante el año hidrológico respectivo. Las cuales se escogieron por su disponibilidad espacial, relevancia hidrológica e implicancia en la generación de escorrentía en las cuencas estudiadas. El procesamiento de series de datos se efectuó mediante Python, complementado con herramientas geoespaciales como Google Earth y QGIS.

5.1. Selección de cuencas y descarga de datos

5.1.1. Criterios de selección de cuencas

La selección de las cuencas se efectuó en función de criterios de representatividad orográfica y nival, ubicación geográfica y calidad de los datos hidrometeorológicos. Se consideraron cuencas andinas o precordilleranas de la macrozona centro-sur de Chile.

El universo inicial estuvo compuesto por 25 cuencas disponibles en la base de datos CAMELS-CL. De estas, se descartaron 10 cuencas debido a lagunas prolongadas en los registros (múltiples meses o años sin datos) e inconsistencias significativas que comprometían la validez del análisis. Se priorizaron cuencas con un aporte nival significativo y mayor precipitación, lo que se evaluó mediante el análisis de atributos geográficos en CAMELS-CL. En particular, se dio preferencia a cuencas con elevaciones medias por sobre los 1000 m s.n.m., que actúan como un indicador de precordillera (FAO, 2012). La confiabilidad de los registros de caudal fue corroborada mediante datos del Banco Nacional de Aguas (DGA). Finalmente, se seleccionaron 15 cuencas, distribuidas equitativamente con tres por cada una de las cinco regiones estudiadas, asegurando una cobertura regional balanceada para el análisis comparativo.

5.1.2. Fuentes y procesamiento de datos

La selección de fuentes de datos robustas, confiables y complementarias fue fundamental para asegurar un análisis representativo de la sequía de nieve en la zona de estudio. Para esta investigación, se emplearon las siguientes bases de datos primarias y plataformas de acceso que contienen información crucial. Estas fueron escogidas por su cobertura espacial y pertinencia para el estudio de hidrología de montaña:

- **Banco Nacional de Aguas (DGA):** Fuente oficial de registros puntuales de caudal y precipitación, a partir de estaciones hidrométricas y pluviométricas distribuidas a lo largo del país (Dirección General de Aguas,

s.f.). Los datos observados de caudal fueron descargados en formato CSV desde el portal del Banco Nacional de Aguas (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>). Se utilizó como base de contraste y verificación, específicamente para validar patrones temporales frente a CAMELS-CL y para completar datos de caudal en el periodo 2020-2021

- **CAMELS-CL (CR2):** Base de datos nacional que ofrece registros hidrometeorológicos de 516 cuencas chilenas (Alvarez-Garretton et al., 2018). Los registros hidrometeorológicos, incluyendo caudal medio mensual y precipitación acumulada proveniente del modelo CR2MET (CR2, 2017), se descargaron en formato CSV desde el sitio oficial del CR2 (<https://camels.cr2.cl/>). Se utilizó el paquete completo de variables, el cual incluye también atributos geomorfológicos y polígonos (delimitación) de cada cuenca. Para complementar la precipitación acumulada del año hidrológico 2020-2021, se descargó el conjunto CR2MET v2.5 (Boisier et al., 2023) en formato NetCDF desde el repositorio Zenodo (<https://zenodo.org/records/7529682>). La plataforma Zenodo (Schirrwagen & Baglioni, 2018) proporciona versiones documentadas con identificador digital permanente (DOI), garantizando la trazabilidad y fiabilidad del dataset utilizado.
- **ERA5-Land:** Conjunto de datos de reanálisis atmosférico desarrollado por ECMWF, que entrega variables climáticas con resolución espacial de 9 km y resolución temporal horaria (Muñoz Sabater, 2019). Las series horarias

de EAN fueron descargadas en formato NetCDF desde el portal del Climate Data Store del Servicio Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/>). Posteriormente, los valores fueron extraídos por bounding box, correspondiente a cada cuenca mediante procesamiento en Python.

5.2. Organización y procesamiento de datos

5.2.1. Delimitación y preprocesamiento espacial de datos grillados

Para la extracción de datos grillados desde ERA5-Land (resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, equivalente a 9 km x 9 km), se utilizaron los polígonos de las 15 cuencas seleccionadas en formato .shp, disponibles en la base CAMELS-CL. Estos archivos fueron importados a QGIS y visualizados complementariamente en Google Earth para verificar su correcta geolocalización y forma. La descarga de los datos se basó en el establecimiento de una cuadrícula mínima (bounding box) para cada cuenca (Torres Abarca, 2016; Ballari, s.f.; Nania, s.f.), definida por las coordenadas geográficas extremas (norte, sur, este y oeste), obtenidas manualmente desde Google Earth a partir de los polígonos cargados anteriormente, como se visualiza en la Figura 4. Esta información fue utilizada para configurar la descarga de los datos grillados desde Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), determinando todos los píxeles que contenían o rodeaban parcialmente cada cuenca.

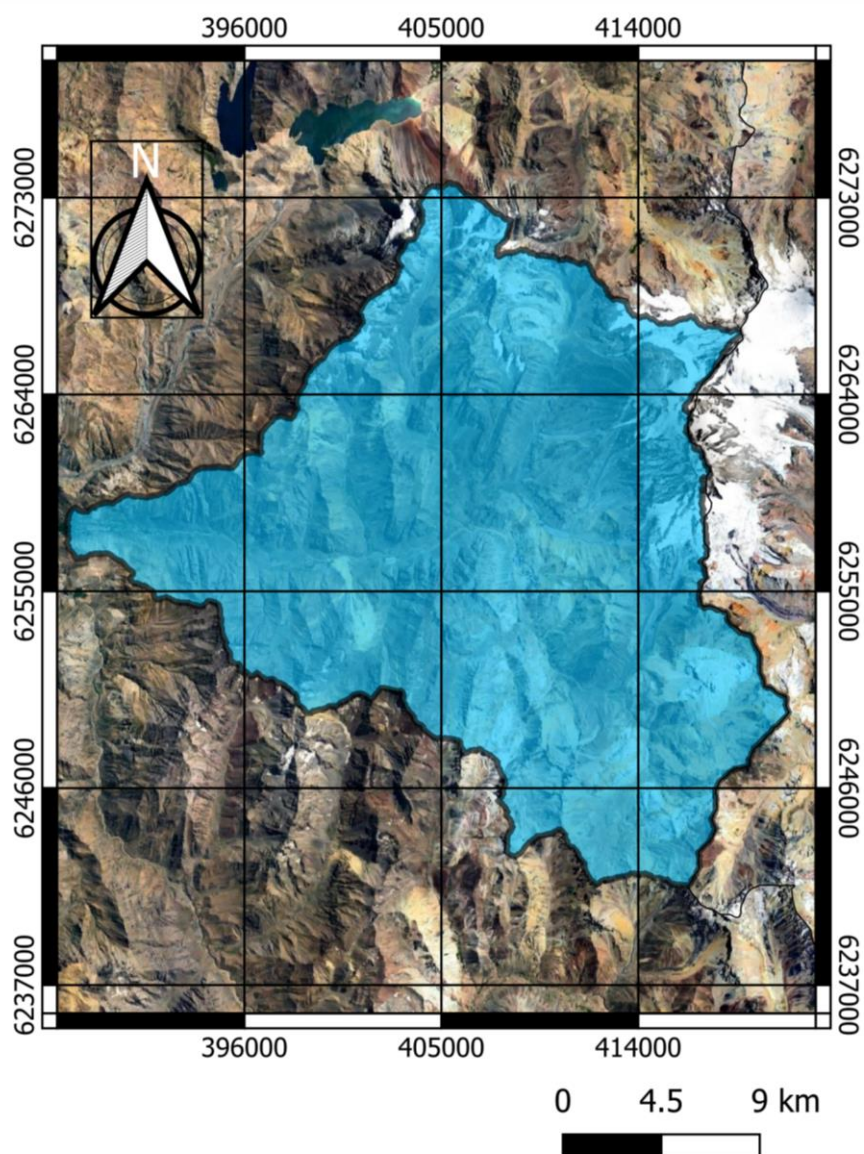


Figura 4. Bounding box de descarga para la cuenca del río Volcán en Queltehues, bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur. La delimitación de las cuencas fue extraída de la plataforma CAMELS-CL (Alvarez.Garreton et al., 2018) superpuesta en una capa de vista satelital Google earth.

Una vez descargados los datos en formato NetCDF, estos fueron procesados mediante scripts en Python, para su inspección y manipulación. Cada píxel fue

asociado a sus coordenadas de latitud y longitud para evaluar su correspondencia espacial con los polígonos de la cuenca.

Con el fin de asegurar una representación espacial precisa y evitar sesgos en el promedio nival, se estableció un umbral mínimo del 10% del área de la cuenca como criterio para la inclusión de píxeles. Considerando que cada píxel ERA5-Land cubre aproximadamente 81 km², se estimó la proporción que representa respecto al área total de cada cuenca (obtenida desde CAMELS-CL). Sólo se incluyeron los píxeles cuya intersección estimada o centralidad dentro del polígono de cuenca superaba este umbral, descartando aquellos periféricos con contribución espacial irrelevante como se observa en la Figura 5, la cual refleja el sistema de grilla en la cual se distribuyen los píxeles y claramente se observa los no representativos, dada la geometría de descarga (bounding box) y la geometría irregular de las cuencas.

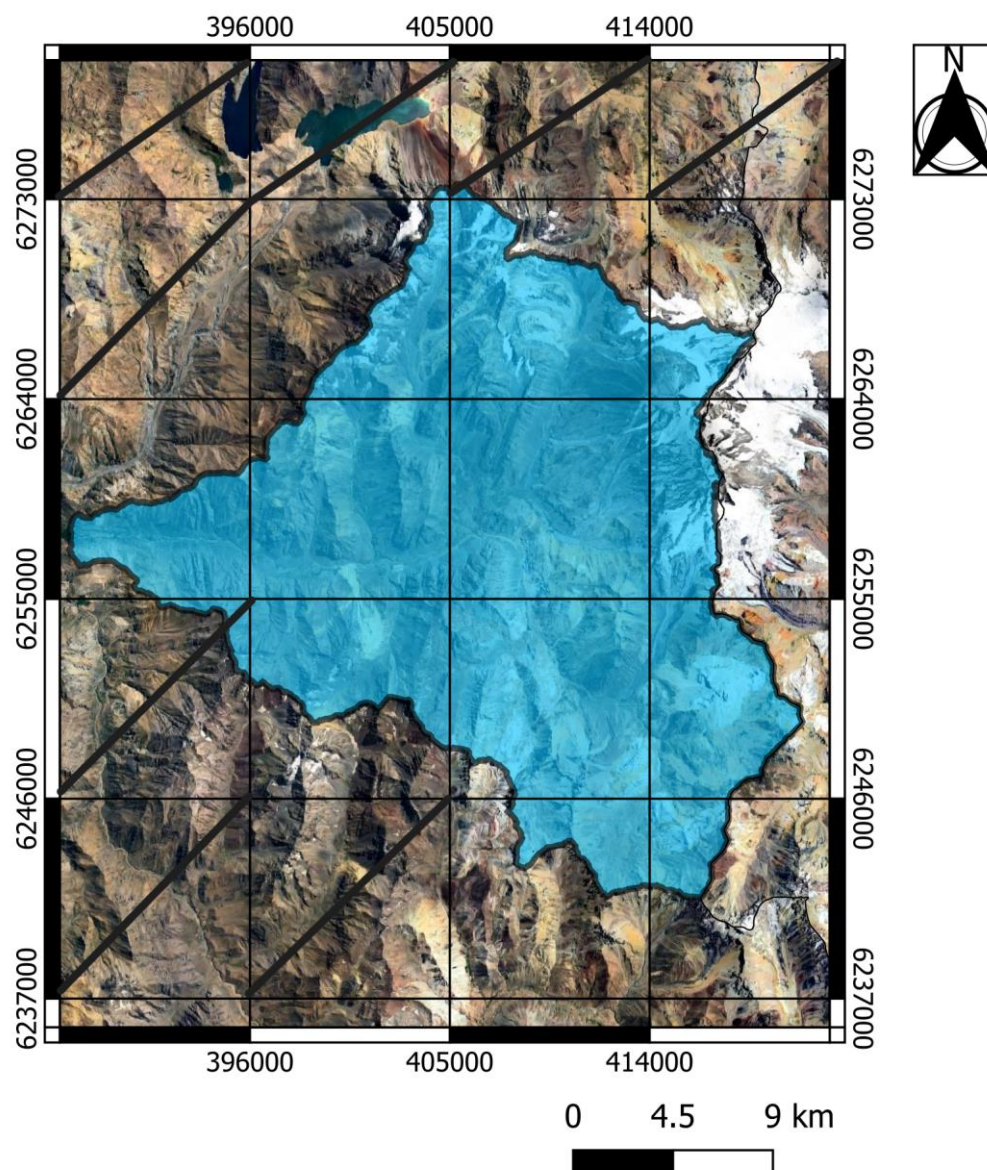


Figura 5. Pixeles representativos cuenca río Volcán en Quiltehue, bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur. La delimitación de las cuencas fue extraída de la plataforma CAMELS-CL (Alvarez-Garretón et al., 2018) superpuesta en una capa de vista satelital de Google earth.

Finalmente, los valores diarios y horarios de EAN en los píxeles seleccionados fueron promediados espacialmente para cada cuenca, generando una serie temporal agregada que representa el comportamiento nival promedio a escala de cuenca. Este enfoque permitió compensar el desajuste geométrico entre la forma irregular de las cuencas y la grilla regular del modelo ERA5-Land.

5.2.2. Organización y control de calidad preliminar

Una vez estructuradas las series temporales por cuenca y variable, se procedió a un control de calidad preliminar con el objetivo de detectar inconsistencias que pudieran comprometer la validez del análisis. El control consideró criterios como: valores extremos no plausibles, registros duplicados, lagunas prolongadas, y transiciones abruptas sin justificación climática o hidrológica aparente. Se aplicó esta revisión a las series provenientes de CAMELS-CL, DGA y ERA5-Land con énfasis en la evaluación de continuidad y coherencia interna entre fuentes. Este proceso incluyó una reestructuración de datos pasando desde el año cronológico (01 de enero hasta el 31 de diciembre) al año hidrológico en Chile que va desde el 01 de abril al 31 de marzo del siguiente año.

5.2.3. Cálculo de variables clave

Una vez asegurada la continuidad y calidad de las series temporales, se calcularon las principales variables hidroclimáticas por cuenca, agrupadas según el año hidrológico. Este proceso permitió generar las bases para el análisis comparativo y la clasificación de eventos de sequía de nieve.

- **Caudales medios mensuales y estacionales:** Se utilizaron los registros de caudal medio mensual provenientes de CAMELS-CL hasta 2020, complementados con datos del Banco Nacional de Aguas (DGA) para el año hidrológico 2020-2021. Ante vacíos puntuales y lagunas prolongadas en meses hidrológicamente relevantes (septiembre-marzo) fueron completadas mediante datos del BNA. Se calcularon también el caudal promedio y acumulado para la temporada de deshielo (septiembre a marzo), considerado como indicador clave de la respuesta hidrológica al derretimiento nival. Este valor será comparado con el caudal medio anual por cuenca.
- **Peak EAN anual:** Se definió como el valor máximo del equivalente de agua en nieve registrado para cada cuenca durante un año hidrológico, a partir de series diarias de ERA5-Land. Para cada año, se identificó el máximo EAN anual. Este procedimiento fue complementado con una agregación mensual secundaria, que permitió validar que el peak se sitúa consistentemente entre agosto y octubre en la zona centro y entre julio y agosto en la zona sur. Este enfoque sigue la metodología propuesta por Hatchett et al. (2022).
- **Precipitación acumulada anual:** Se calculó como la suma de los valores mensuales de precipitación media, provenientes de CAMELS-CL y complementados con la versión 2.5 de CR2MET (Zenodo), cubriendo cada año hidrológico. Esta variable constituye el segundo eje de la clasificación multivariable de sequía de nieve.

En todos los casos, las operaciones de agregación temporal, detección de máximos y validación de series se realizaron en software de análisis de datos (Python y Excel), garantizando un control total del flujo de trabajo. Los informes hidrométricos de referencia proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA) fueron utilizados como validación cualitativa, accediendo a su plataforma oficial (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>).

5.3. Clasificación de tipo de sequías de nieve

Para identificar y caracterizar los diferentes tipos de sequías de nieve, se aplicó una metodología basada en cuadrantes climáticos (Hatchett et al., 2022) tal y como se ilustró anteriormente en la Figura 2. Este enfoque bidimensional considera los percentiles de la precipitación total anual en el eje X y los percentiles del peak EAN anual en el eje Y, permitiendo representar gráficamente las condiciones combinadas de cada año hidrológico en las cuencas estudiadas.

El criterio de clasificación se basó en el percentil 50 (mediana) calculado individualmente para cada cuenca, tanto para la precipitación como para el peak EAN, a partir del periodo completo de análisis (1990-2021). La intersección de ambos umbrales define cuatro cuadrantes que representan diferentes regímenes hidronivales:

- Año húmedo y nevado (Primer cuadrante): Se refiere a los años en los que tanto la precipitación total anual como el peak EAN anual se encuentran por encima de la mediana. Representa condiciones favorables, con adecuada acumulación nival y aporte hídrico.

- Año seco pero nevado (Segundo cuadrante): El peak EAN está por encima del percentil 50, mientras que la precipitación queda por debajo. Indica que, pese a una baja entrada hídrica total, la acumulación de nieve fue eficiente, estas condiciones reflejan la capacidad de una reserva nival significativa para mitigar los efectos de una baja disponibilidad de agua líquida.
- Sequía de nieve seca (Tercer cuadrante): Define los años en los que ambos indicadores se encuentran por debajo de la mediana. Este escenario representa una condición crítica de escasez tanto en precipitación como en almacenamiento nival.
- Sequía de nieve cálida (Cuarto cuadrante): Corresponde a los años en los que la precipitación total anual está por encima del percentil 50%, pero el peak EAN anual se encuentra por debajo. Este tipo de sequía sugiere un aumento en la proporción de lluvia versus nieve (Fuenzalida, 2023), una menor acumulación nival y/o una fusión prematura del manto (Coumerme, 2021), asociado a condiciones térmicas inusualmente altas o a lluvias, lo que trae consigo un deshielo acelerado, tal como se describe en Muñoz-Sabater et al. (2021).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Resultados

6.1.1. Análisis regional del EAN y caudales medios de deshielo

El peak EAN y el caudal de deshielo son variables clave para entender la funcionalidad hidrológica de las cuencas andinas frente al cambio climático. El primero resume la magnitud del almacenamiento sólido invernal; el segundo, su traducción en aporte fluvial durante los meses de mayor demanda. Las Figuras 6 y 7 evidencian un contraste hidrológico marcado entre las zonas centro y sur de Chile. En cuencas de mayor altitud y régimen nival-glaciar como Yerba Loca ($R^2 = 0.77$), Volcán ($R^2 = 0.85$), Pangal ($R^2 = 0.80$) y Tinguiririca ($R^2 = 0.78$), se observa una fuerte correlación entre el peak EAN y el caudal de deshielo. Esta relación no solo explica la alta capacidad predictiva observada, sino que demuestra que, en estas zonas de alta cota (2000 a 3000 msnm), el caudal estival está fuertemente regulado por la magnitud del almacenamiento sólido invernal, Tal y como señala Crespo et al., (2020) la disminución de las precipitaciones y aumento de temperaturas que generan retrocesos de glaciares, disminución de capa de nieve, cambio en el monto y tipo de precipitación, exigen medidas de adaptación y regulación en esta zona crítica.

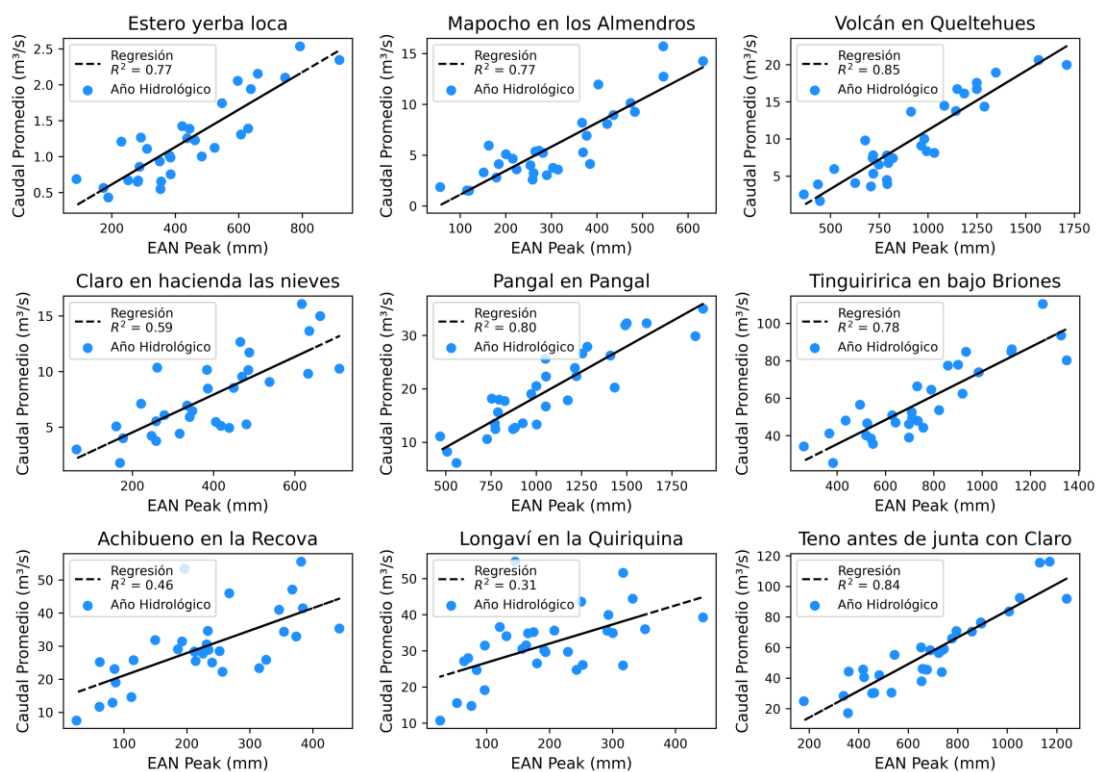


Figura 6. Relación entre peak anual EAN y caudal promedio de deshielo en cuencas de la zona centro (Regiones Metropolitana, O'Higgins y Maule), para el periodo 1990-2021.

En contraste, cuencas ubicadas en la zona sur como el estero Renegado en Invernada ($R^2 = 0.17$), Río Diguillín ($R^2 = 0.33$), Río Duqueco ($R^2 = 0.07$), Río Rucue ($R^2 = 0.04$) y Río Lonquimay ($R^2 = 0.28$) presentan una baja capacidad predictiva del EAN sobre el caudal de deshielo estacional. Esta baja correlación se explica por el predominio del régimen pluvial o pluvio-nival. La hidrografía del sur se caracteriza por ríos alimentados por deshielos y lluvias constantes, con caudales abundantes y tranquilos en su curso bajo (Kimün-Ko ,s.f.), lo que reduce la dependencia del caudal exclusivamente del deshielo de la nieve. En

estos sistemas hidrológicos, la escorrentía directa domina la respuesta debido a la menor altitud y topografía menos abrupta, lo que reduce la persistencia del manto nival y debilita la relación peak EAN-caudal (Garreaud et al., 2016; Scaff et al., 2017).

Se puede observar tal fenómeno al comparar la información entregada en la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 4 y Tabla 6, de estas se observa claramente que aquellas cuencas con mayor altitud (> 2.500 m s.n.m) y régimen nival y/o glaciar, presentan correlaciones mayores lo cual va de la mano con cuencas que se ubican en su mayoría por sobre la línea de nieve (Tabla 6). Mientras que aquellas cuencas con altitudes bajas (< 1.250 m s.n.m), presentan correlaciones muy bajas, lo cual implica una menor cobertura y mayor predominio de precipitación líquida. En resumen, el EAN es una variable predictora confiable en cuencas con control nival-glaciar, pero sus limitaciones son visibles y esperables en sistemas con régimen pluvial, como los observados en la Figura 6, Longaví en la Quiriquina ($R^2 = 0.31$), y en la Figura 7 cuencas de la zona sur del estudio ($R^2 < 0.56$).

Tabla 6. Clasificación de rango de isoterma 0°C de las cuencas en estudio según su altitud media y zona geográfica, basada en Dirección meteorológica de Chile (2020). Elaboración propia

Zona Geográfica	Regiones representativas	Altitud media de Isoterma 0°C (m.s.n.m)	Observaciones
Zona norte	Arica y Parinacota hasta Coquimbo	4.000 - 5.000	Incluso en meses invernales, la isoterma se mantiene en cotas elevadas
Zona central	Valparaíso hasta Maule	1.500 - 3.500	Amplia variabilidad invernal: desde frentes fríos (1.500 msnm) hasta ríos atmosféricos (sobre 3.000 msnm)
Zona sur	Ñuble hasta Los Lagos	1.200 - 1.500	Alturas significativamente menores que en la zona central, permitiendo precipitación sólida en cotas menos elevadas.

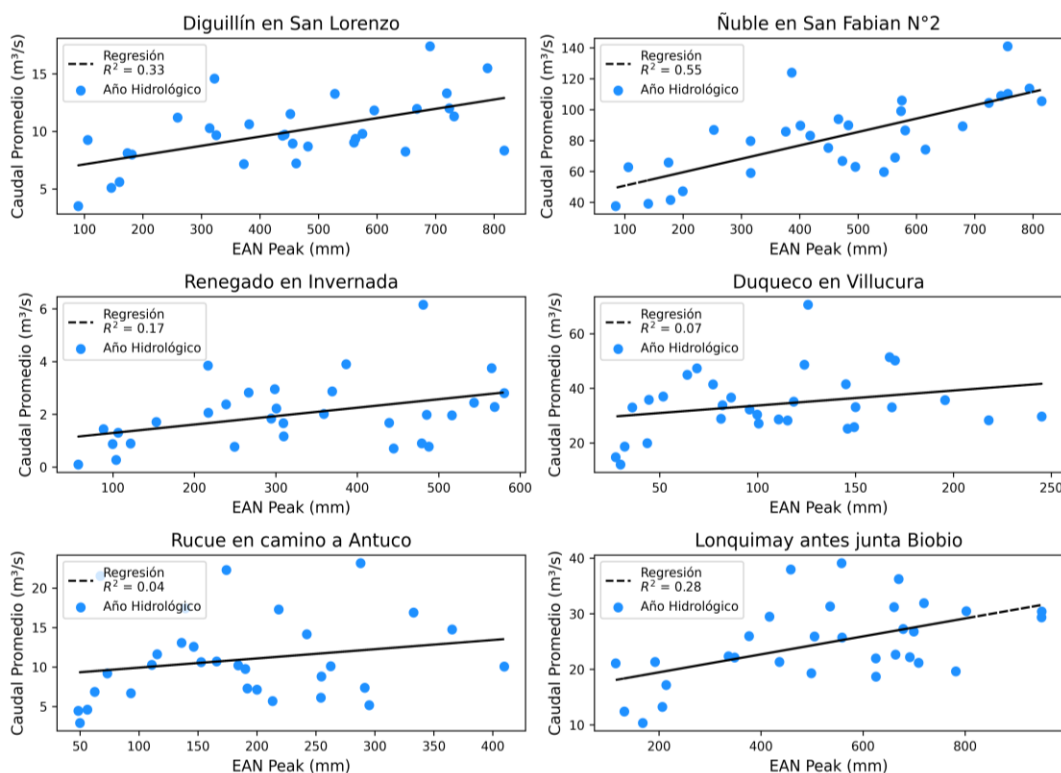


Figura 7. Relación entre peak anual de EAN y caudal promedio de deshielo en cuencas de la zona sur (Regiones de Ñuble y Biobío), para el periodo 1990-2021.

El peak EAN y el caudal de deshielo son variables clave para entender la funcionalidad de las cuencas andinas frente al cambio climático. Las Figuras 8 y 9 reflejan un marcado contraste hidrológico entre las zonas centro y sur de Chile. La Figura 8 presenta la acumulación nival promedio anual. Las cuencas del centro, como Pangal en Pangal (1070 mm), Volcán (920 mm) y Tinguiririca (766 mm), presentan los valores más altos, reflejando condiciones óptimas para la formación y persistencia del manto nival en alta montaña. En contraste, cuencas del Biobío como Duqueco (109 mm) y Rucue (187 mm) registran valores significativamente menores, debido a corresponder a cuencas de menor

altitud (< 1.500 msnm). Cabe destacar las cuencas del Longaví (194 mm) y Achibueno (226 mm) en el Maule, sus bajos valores de peak EAN, atípicos para la zona central, sugieren que su respuesta hidrológica está menos ligada al almacenamiento nival y más a factores locales como la precipitación líquida o las características específicas de su geomorfología o fenómenos regionales.

La Figura 9 compara el caudal promedio anual con el de la temporada de deshielo (septiembre-marzo). En cuencas de alta cota de la zona centro (Yerba Loca, Volcán, Pangal), más del 70% del caudal anual se concentra durante el periodo de deshielo. Particularmente, en cuencas nival-glaciares como Yerba Loca, la mayor parte del caudal anual ocurre en esos meses, lo que refleja una fuerte dependencia de la reserva de nieve. En contraste, cuencas más australes (Rucue, Duqueco y Lonquimay) presentan una menor proporción estacional, lo que reafirma un régimen mayoritariamente pluvial influenciado por precipitaciones invernales bajo la isoterma y esorrentía constante a lo largo del año.

Está marcada disparidad se debe a factores geográficos y topográficos, como la disminución de la altura de la cordillera de los Andes a partir de los 35°S (Mernild et al., 2017) y la altitud de la isoterma 0°C (Mardones & Bascuñan, 2019), lo cual reduce la superficie de acumulación nival. Asimismo, las temperaturas más templadas a menor altitud pueden causar eventos de lluvia sobre nieve (Glasner, 2022), lo que desincroniza la relación entre el máximo de nieve acumulada y la esorrentía total.

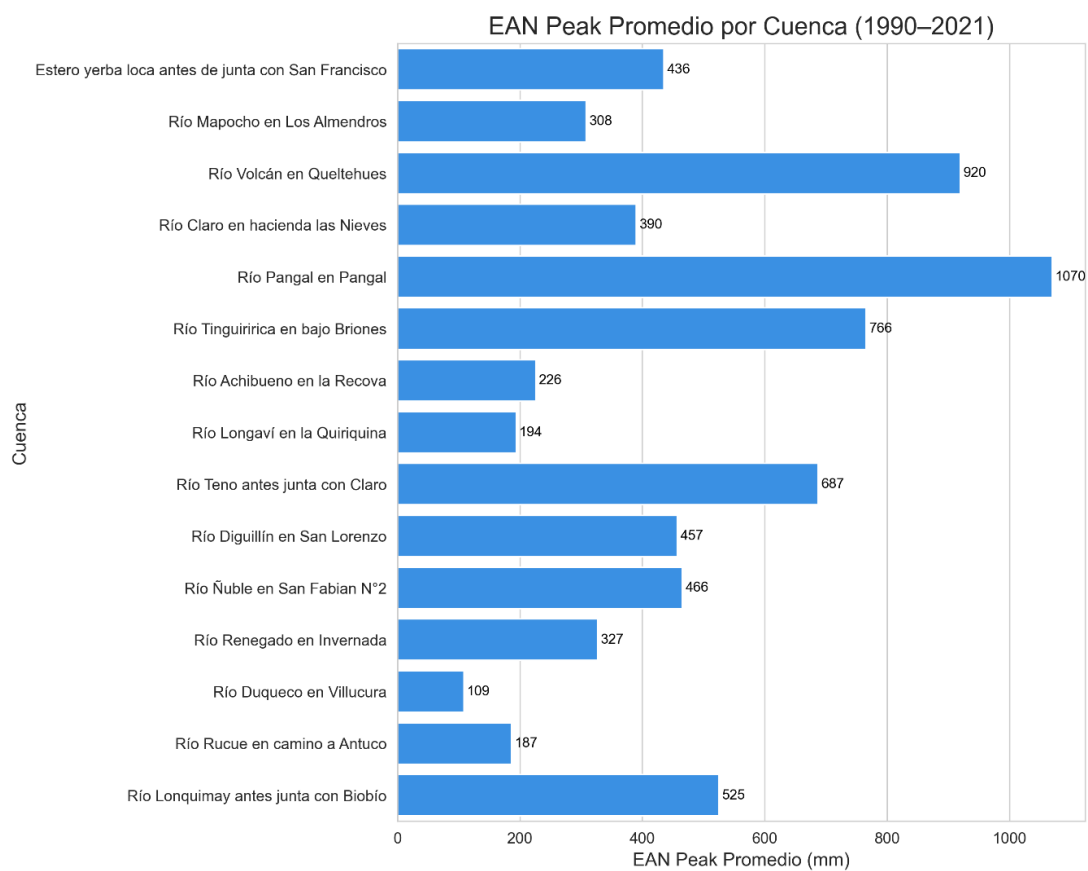


Figura 8. Valor promedio del peak de equivalente en agua de nieve (EAN) por cuenca en el periodo 1990-2021.

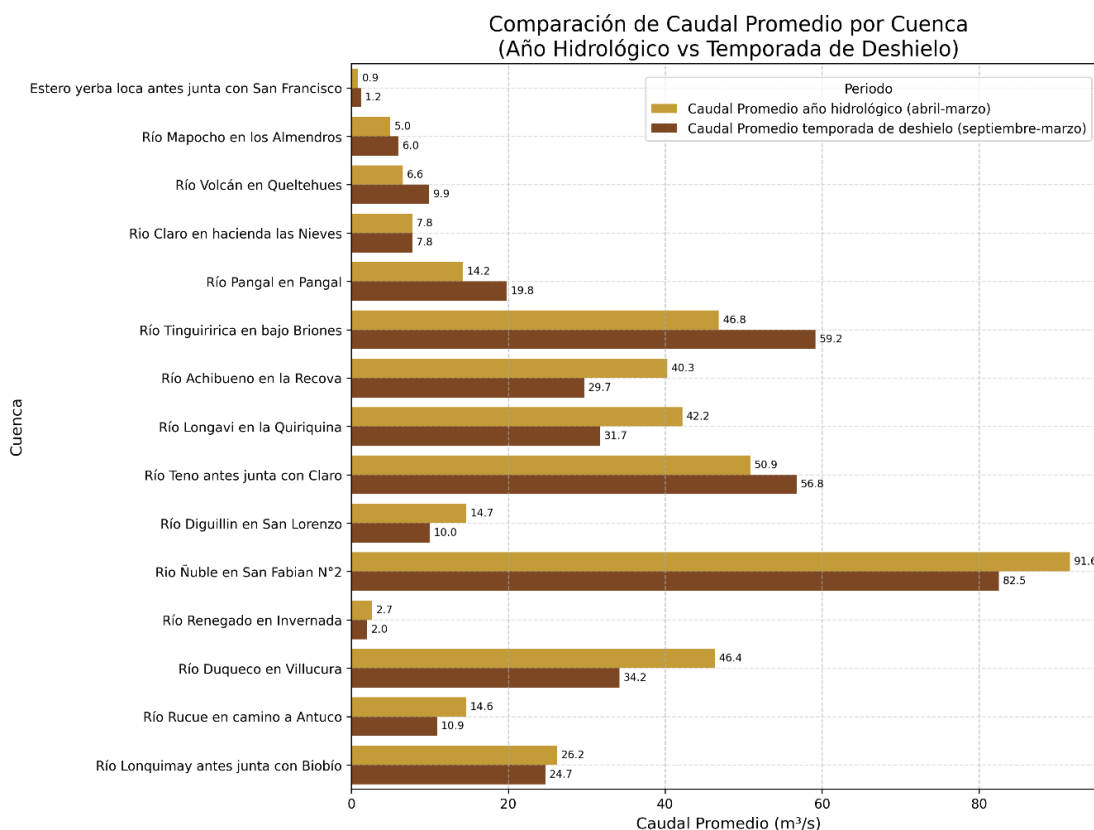


Figura 9. Comparación del caudal promedio anual por cuenca entre el año hidrológico completo (abril-marzo) y la temporada de deshielo (septiembre-marzo) para el periodo 1990-2021.

En conjunto, estos resultados permiten establecer las diferencias esenciales entre los regímenes hidrológicos. Mientras las cuencas del centro demuestran una mayor vulnerabilidad ante la disminución de la acumulación nival, la zona sur presenta una mayor complejidad, con algunas cuencas que podrían pasar de tener un régimen nival a mixto o viceversa, lo cual es crucial para la gestión hídrica futura (Alvarez-Garretón et al., 2021; Stewart, 2009).

6.1.2. Análisis de distribución de sequías de nieve

El comportamiento interanual del manto nival se manifiesta no solo en su magnitud y respuesta hidrológica, sino también en la frecuencia de los distintos tipos de años hidrológicos. Esta sección analiza la distribución de los años húmedo y nevados, secos pero nevados, sequías de nieve seca y sequías de nieve cálida, cuya ocurrencia varía significativamente entre cuencas. La Tabla 7 muestra una transición climática progresiva de norte a sur. En la zona central, predominan los años húmedo y nevados, favorecidos por una orografía elevada. Sin embargo, los años con sequía de nieve seca también son frecuentes. Cuencas como río Volcán y río Pangal mantienen una clara mayoría de años húmedos y nevados (> 48%). En el Maule se observa una distribución más equilibrada entre años favorables, secos y cálidos, lo que sugiere una mayor inestabilidad y fragmentación del régimen nival, marcada por un descenso altitudinal y un aumento térmico.

Hacia el sur, la distribución se vuelve más variable y a su vez disminuyen los años húmedos y nevados (< 39%) y aumentan los eventos cálidos (> 13%). Puntualmente cuencas como río Lonquimay y río Duqueco apenas alcanzan el 33% de años húmedos y nevados, mostrando un alza significativa en sequías de nieve cálidas (22.6% y 19.4%, respectivamente). Esta tendencia confirma un cambio en la forma de precipitación, actualmente predominan lluvias invernales en cotas donde históricamente se acumulaba nieve (Vásquez et al., 2025). Este cambio de fase, impulsado por el ascenso sostenido de la isoterma 0 °C, debilita la formación del manto nival y acorta su persistencia estacional, afectando la

funcionalidad hídrica de primavera-verano. En conjunto, la distribución de los tipos de año no obedece a un patrón aleatorio, sino que refleja diferencias claras entre cuencas, estableciendo las bases para el análisis de tendencias temporales y comprender el cambio en el tiempo de esta clasificación climática.

Tabla 7. Frecuencia porcentual de clasificación climática por tipo de año hidrológico en cada cuenca (1990-2021).

Cuenca	Año húmedo y nevado	Año seco pero nevado	Sequía de nieve seca	Sequía de nieve cálida
Estero Yerba Loca antes de junta con San Francisco	45,2%	6,5%	41,9%	6,5%
Río Mapocho en Los Almendros	38,7%	12,9%	35,5%	12,9%
Río Volcán en Queltehues	48,4%	3,2%	45,2%	3,2%
Río Claro en hacienda Las Nieves	35,5%	16,1%	32,3%	16,1%
Río Pangal en Pangal	48,4%	3,2%	45,2%	3,2%
Río Tinguiririca en bajo Briones	41,9%	9,7%	38,7%	9,7%
Río Achibueno en La Recova	35,5%	16,1%	32,3%	16,1%
Río Longaví en la Quiriquina	35,5%	16,1%	32,3%	16,1%
Río Teno antes de junta con Claro	41,9%	9,7%	38,7%	9,7%
Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)	38,7%	12,9%	35,5%	12,9%
Río Ñuble en San Fabián N°2	38,7%	12,9%	35,5%	12,9%
Río Renegado en Invernada	35,5%	16,1%	32,3%	16,1%
Río Duqueco en Villucura	32,3%	19,4%	29,0%	19,4%
Río Rucue en camino a Antuco	32,3%	19,4%	29,0%	19,4%
Río Lonquimay antes de junta con Biobío	29,0%	22,6%	25,8%	22,6%

6.1.3. Análisis temporal de sequías de nieve

Entender si las condiciones observadas son persistentes, cíclicas o parte de una transición hidrológica mayor, resulta clave para anticipar escenarios de disponibilidad hídrica bajo cambio climático. Este análisis se realiza mediante un enfoque por quinquenios hidrológicos agrupados entre 1990 y 2021.

El análisis temporal revela un punto de quiebre claro en la década de 2010, durante los primeros cuatro quinquenios (1990-2009), las condiciones favorables dominaban en la zona central. Los años húmedos y nevados se situaban consistentemente alrededor del 60% (Figuras 10 y 11) y 53% (Figura 12). Posterior a 2010, estos valores se desplomaron hasta el 17%, 10% y 10% respectivamente. Esta secuencia repleta por años de bajas precipitaciones llevó al predominio de las sequías de nieve (cálidas y secas), que representan el 73% del total de años analizados en la zona central. La transformación se manifestó en incrementos de eventos secos, la sequía de nieve seca pasó de un 0% a un 80% en la región Metropolitana, de un 27% a un 53% en la región de O'Higgins y de un 7% a un 47% en la región del Maule, además la sequía de nieve cálida experimentó un alza notable del 2% al 27% en la región de O'Higgins.

Este cambio es un quiebre en los patrones históricos (Garreaud et al., 2017) que evidencia una tendencia clara hacia la disminución de precipitaciones, el aumento de temperaturas y la consecuente pérdida del manto nival en Chile central (Garreaud et al., 2020; Hernández-Duarte et al., 2021). El último año hidrológico (2020-2021) refleja esta crisis en forma aguda (Tabla 8), donde hubo una ausencia total de años húmedos y nevados, con predominio de la categoría

seco pero nevado (66%) y presencia de eventos se sequía de nieve seca y cálida en regiones clave.

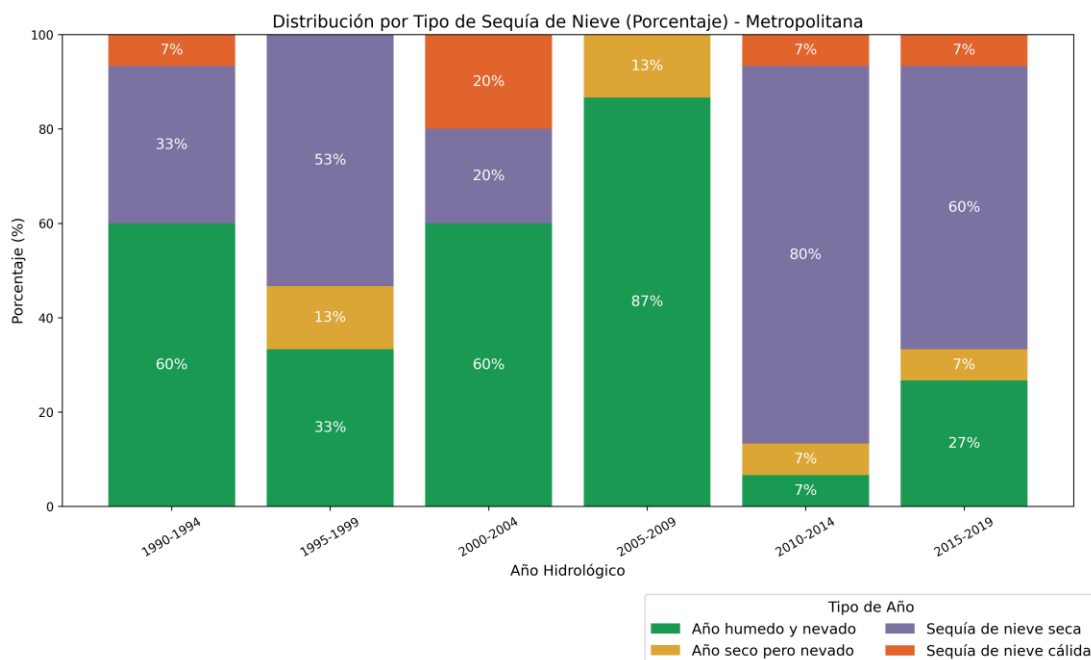


Figura 10. Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región Metropolitana.

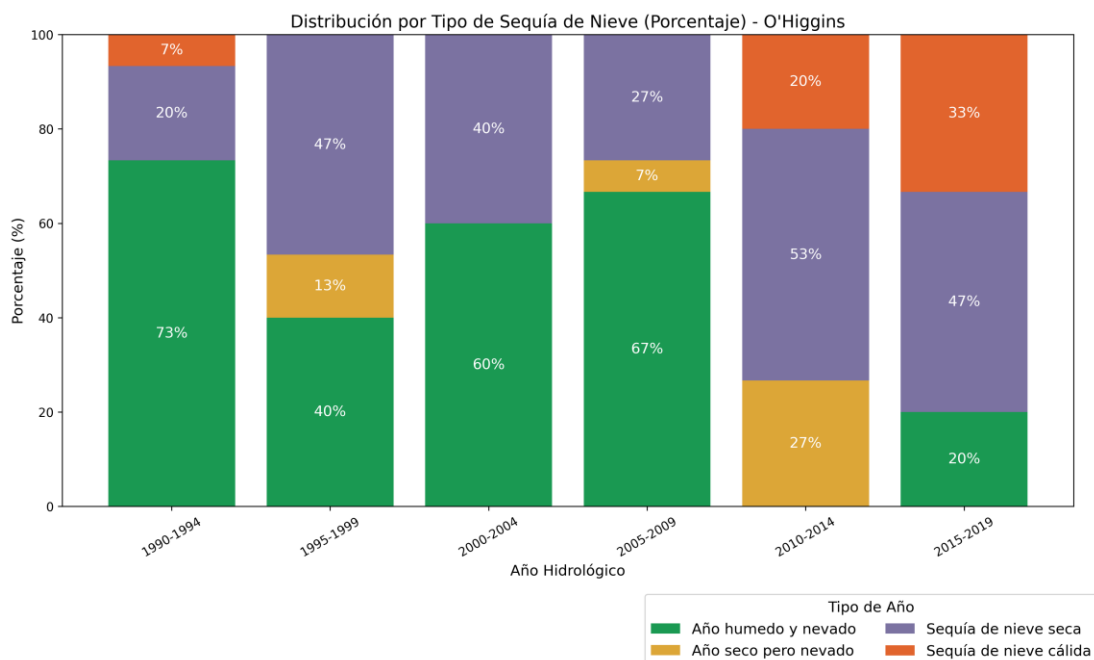


Figura 11. Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región de O'Higgins.

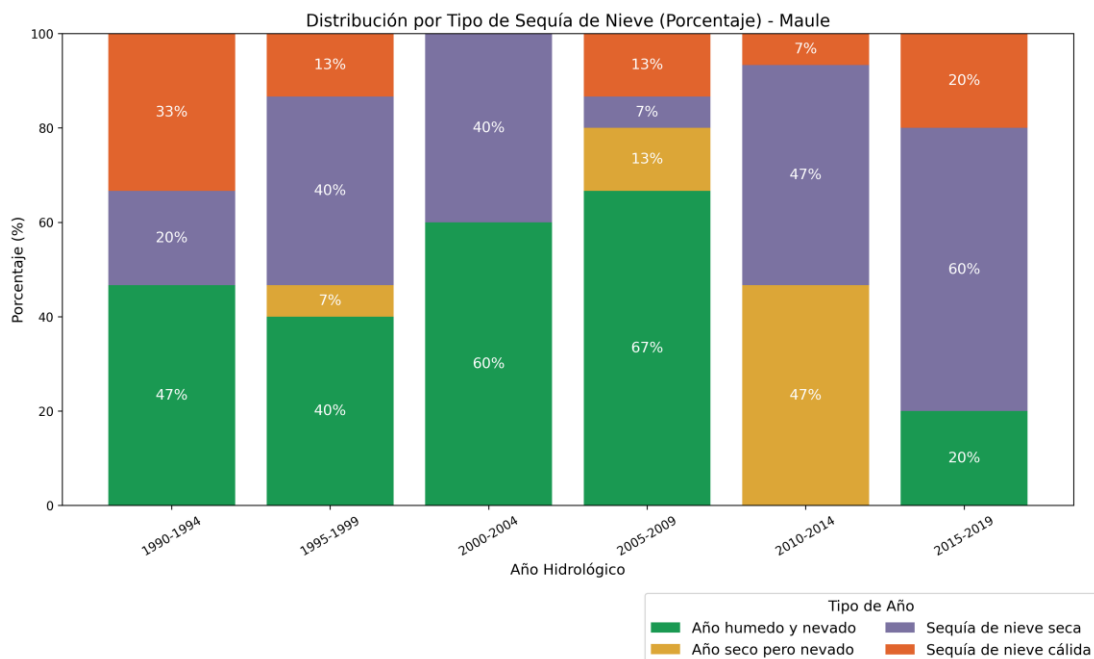


Figura 12. Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región del Maule.

En contraste, las regiones de Ñuble (Figura 13) y Biobío (Figura 14) presentan desde los primeros quinquenios una mayor proporción de años cálidos y secos, lo que evidencia un régimen más templado y menos dependiente del almacenamiento nival.

En esta zona, no se observa un cambio abrupto, sino una persistencia de condiciones adversas. Sí bien entre 1990 y 2009 predominaba la clasificación de año húmedo y nevado (45,8%), los eventos de sequía de nieve cálida (25,9%) y seca (22,8%), estaban bastante más distribuidos que en la zona centro, muestra una dinámica hidrológica distinta a la del centro, donde la precipitación líquida sigue jugando un rol importante. Conforme a la década 2010-2019 el cambio es evidente los eventos de sequía de nieve seca (51,5%) y cálida (31,8%), son la nota que se repite, demostrando un cambio a eventos predominados por la escasez de precipitación, nieve, además es interesante como los eventos menos comunes son aquellos que asegurarían una mayor proporción de manto nival y reserva de agua para el deshielo, los años húmedos y nevados (15%) y años secos pero nevados (1,7%).

En el año hidrológico 2020-2021 la presencia de años secos pero nevados (100%) es total, muestra una dinámica hidrológica distinta a la del centro, donde la precipitación líquida sigue jugando un rol importante, pero es cada vez más escasa. No obstante, esta variación no implica estabilidad climática, sino que su régimen ya operaba con menos nieve confiable, siendo además vulnerable a factores como el sobre aprovechamiento de aguas subterráneas (Arumí et al., 2012; Leiva, 2020), debido a la menor oferta de aguas de deshielo primaveral.

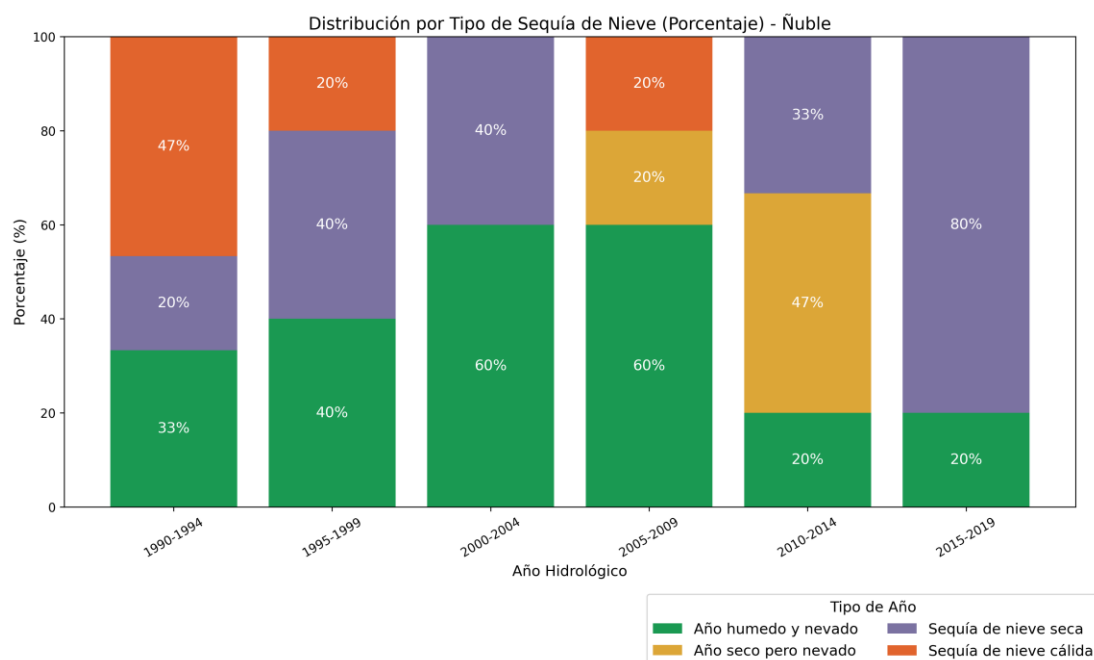


Figura 13. Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región del Ñuble.

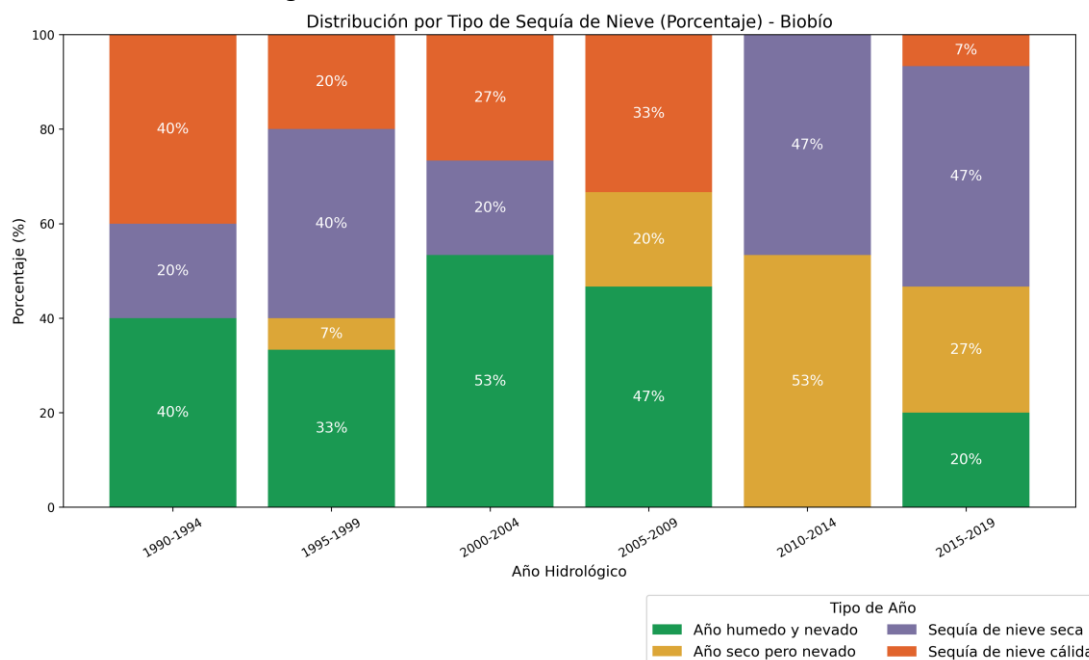


Figura 14. Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio en la Región del Biobío.

La distribución porcentual por quinquenio de las 15 cuencas (Figura 15) permite visualizar el deterioro del régimen nival como una tendencia generalizada. Los años clasificados como sequía de nieve (cálida y seca) representan el 42% entre 1990 y 2009, pero esta cifra ascendió al 65% posterior a 2010 para toda la macrozona.

Esta evidencia muestra que el cambio estructural en los patrones hidrológicos de montaña no se trata de fluctuaciones cíclicas, sino de un proceso sostenido de cambio climático (Garreaud, 2013; Pica-Téllez et al., 2020; Vásquez et al., 2025). La diferencia radica en la intensidad, el cambio en la zona centro es reciente, intenso y abrupto, mientras que en el sur parece haber normalizado un régimen sin nieve confiable desde hace más tiempo.

El claro predominio de las sequías de nieve resalta la vulnerabilidad de las cuencas a los cambios climáticos y desastres por fenómenos extremos (IPCC, 2014). La creciente frecuencia de estos eventos, combinada con el aumento de las temperaturas y factores como la expansión urbana y los cambios de uso de suelo, acrecientan las amenazas hidroclimáticas (Welz et al., 2016). Esto sugiere un futuro de menor disponibilidad hídrica proveniente de la nieve, con graves implicaciones para la seguridad del hídrica y el desarrollo humano en las regiones más pobladas (Henríquez, 2016).

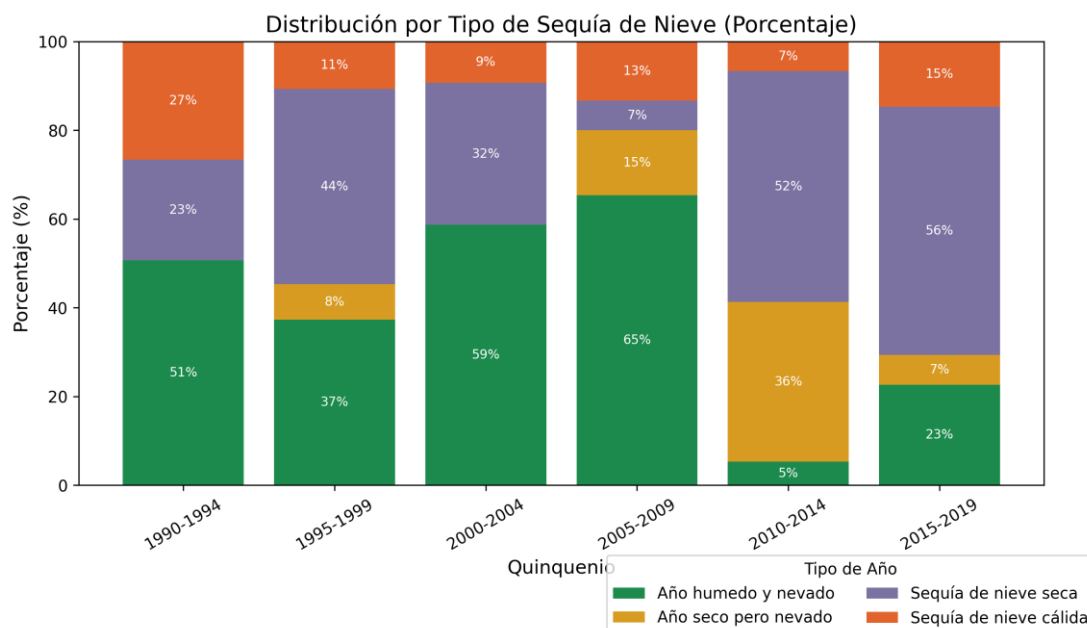


Figura 15. Distribución porcentual por tipo de sequía de nieve por quinquenio para la macrozona centro-sur entre los años hidrológicos 1990-2020

Tabla 8. Frecuencia porcentual de clasificación climática por tipo, a nivel regional y de macrozona centro-sur en el año hidrológico (2020-2021).

Zona	Año húmedo y nevado	Año seco pero nevado	Sequía de nieve seca	Sequía de nieve cálida
Región Metropolitana	0%	33,3%	33,3%	33,3%
Región del Libertador Bernardo O'Higgins	0%	66,6%	33,3%	0%
Región del Maule	0%	100%	0%	0%
Región del Ñuble	0%	100%	0%	0%
Región del Biobío	0%	100%	0%	0%
Macrozona centro-sur	0%	80%	13%	7%

6.1.4. Análisis de tipo de sequía de nieve y caudales de deshielo

Para examinar la relación entre la clasificación climática anual y el caudal medio de primavera-verano en cada cuenca. Se utilizarán gráficos de dispersión multivariantes, adaptados desde Hatchett et al. (2022), que integran el peak EAN y la precipitación acumulada por percentiles caracterizados por caudal. Esta representación permite identificar patrones según el tipo de año hidrológico. Cada subsección aborda una cuenca individual, destacando la

distribución de eventos en los cuadrantes climáticos y su relación con la generación de caudal. Se busca identificar configuraciones climáticas que condicionan la eficiencia hídrica-nival, así como la recurrencia de eventos extremos o atípicos. Además de entregar un balance por zonas a modo de balance general.

6.1.4.1. Región Metropolitana Estero Yerba Loca antes de junta con San Francisco

Al examinar esta cuenca se observa con claridad el predominio de años húmedos y nevados (45%) esto sucede mayoritariamente entre los años 1990 y 2009 reflejados en la Figura 16, con eventos relevantes como lo son los años 1997, 2002 y 2005 que combinan altos percentiles de precipitación y peak EAN, además de los mayores caudales de deshielo ($> 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), lo que refleja una correcta eficiencia del ciclo nival. Por el contrario a partir del 2010, coincidentemente en línea con el fenómeno de mega sequía que afecta al país, se intensifica la ocurrencia de años con sequías de nieve seca (42%), con valores bajos simultáneos en ambos ejes, asociado a caudales deficientes ($< 0,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Sí bien esta cuenca refleja los extremos (años húmedos y muy secos), existe presencia intermitente de años secos pero nevados (2) y sequías de nieve cálida (2). En sí la distribución temporal de esta cuenca refleja una transición desde años mayormente húmedos hacia configuraciones progresivamente más secas y menos eficientes, con predominancia reciente en los cuadrantes de menor acumulación hídrica y nival.

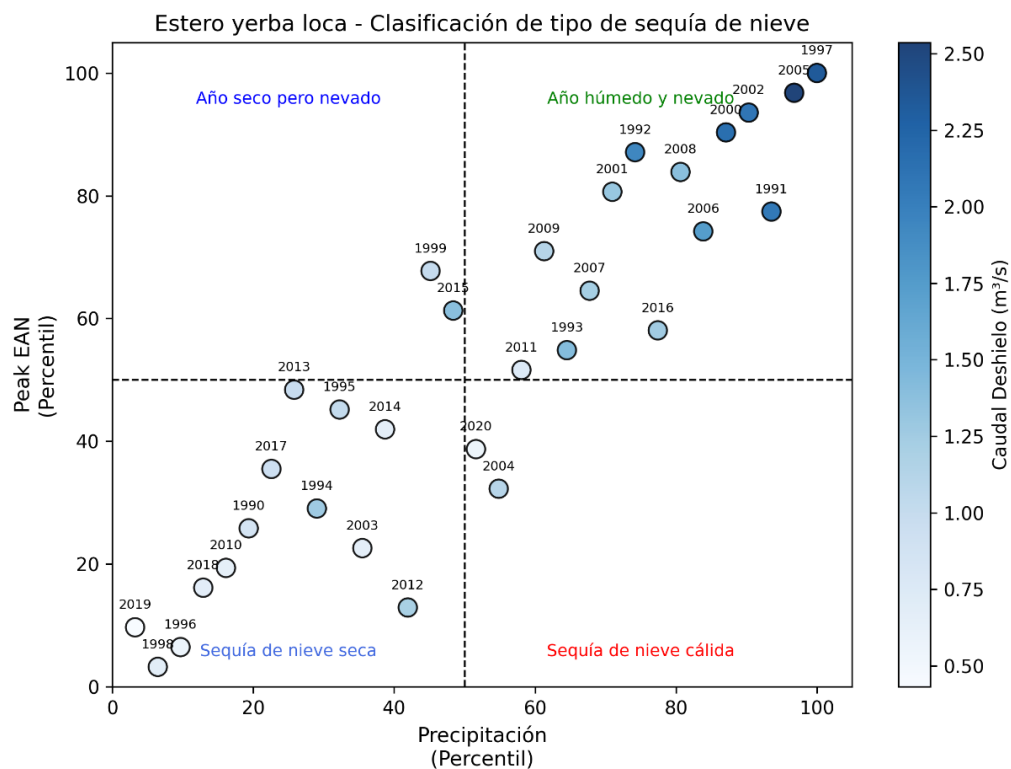


Figura 16. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en Estero Yerba Loca (1990-2021).

6.1.4.2. Región Metropolitana río Mapocho en Los Almendros

Los años húmedos y nevados predominan en ocurrencia ($\approx 39\%$), aunque se concentran con mayor frecuencia entre (1990-2009), los años con eventos destacados son 1997, 2002 y 2005 que exhiben los mayores registros de precipitación y peak EAN, junto a caudales superiores a $12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Posterior al año hidrológico 2010, se genera una variación marcada y aumenta la presencia de años con sequías de nieve seca e incluso algunos consecutivos (2017, 2018, 2019), estos caracterizados por caudales deficientes ($> 3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y bajos registros de precipitación y peak EAN. A diferencia de las demás cuencas de la región Metropolitana en esta cuenca los eventos menor recurrentes como lo son

año seco pero nevado y sequía de nieve cálida, presentan 4 registros cada uno lo que evidencia una distribución más heterogénea posterior al año 2000 tal y como se presenta en la Figura 17. La distribución de eventos indica una pérdida progresiva de años con mayor eficiencia nival, variando hacia configuraciones mayoritariamente secas y menos productivas hacia el final del periodo.

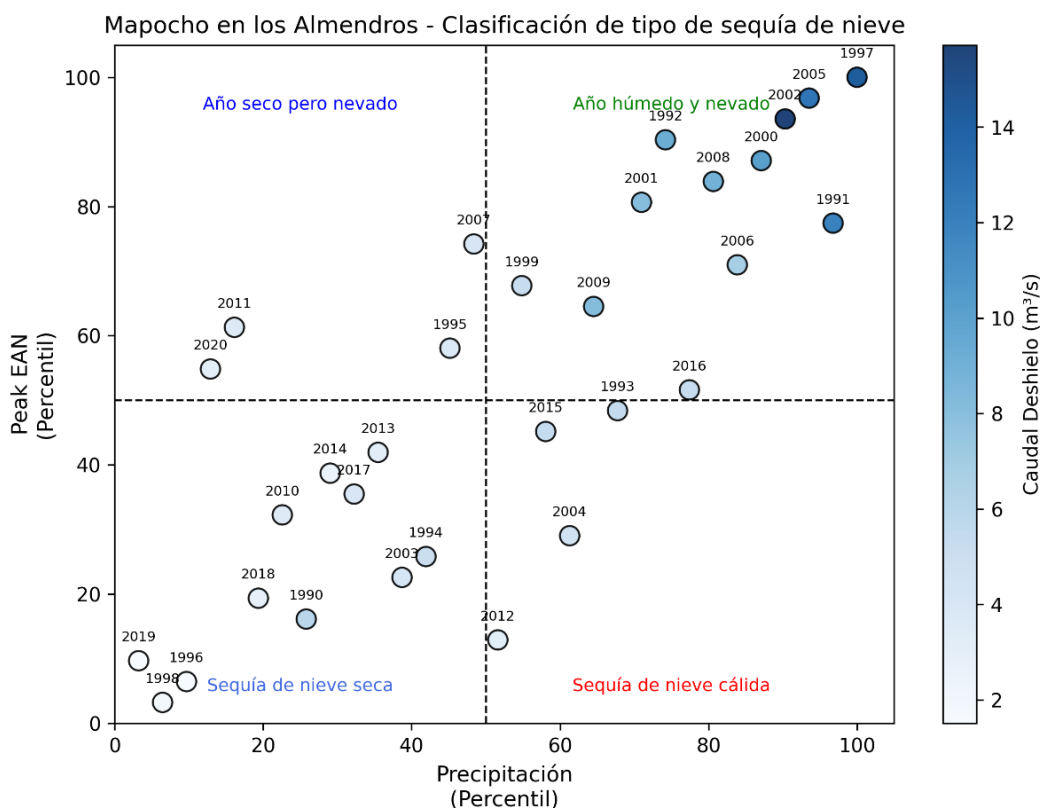


Figura 17. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en Río Mapocho en los Almendros.

6.1.4.3. Región Metropolitana río Volcán en Queltehués

Esta cuenca presenta un claro predominio entre años húmedos y nevados ($\approx 48\%$) y sequía de nieve seca ($\approx 45\%$), mientras que también existe 1 evento de sequía de nieve cálida (2004) y año seco pero nevado (2007).

Mayoritariamente los años húmedos y nevados se concentraron entre 1990 y 2009 y con eventos destacados en los años 1997 y 2005, con caudales por sobre $19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Posterior al año 2010 se eleva la frecuencia de años en el cuadrante de sequía de nieve seca, como 2019, el cual registro uno de los valores más los bajos de EAN ($> P10$), precipitación ($> P10$) y caudales de deshielo ($> 3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La Figura 18 refleja todo este análisis de manera gráfica, en síntesis, la cuenca mantiene una mayor presencia de años con una elevada acumulación nival, sin embargo, en la última década se posicionaron eventos menos eficientes y marcados por la ausencia de precipitación, baja cobertura nival y disminución de caudales.

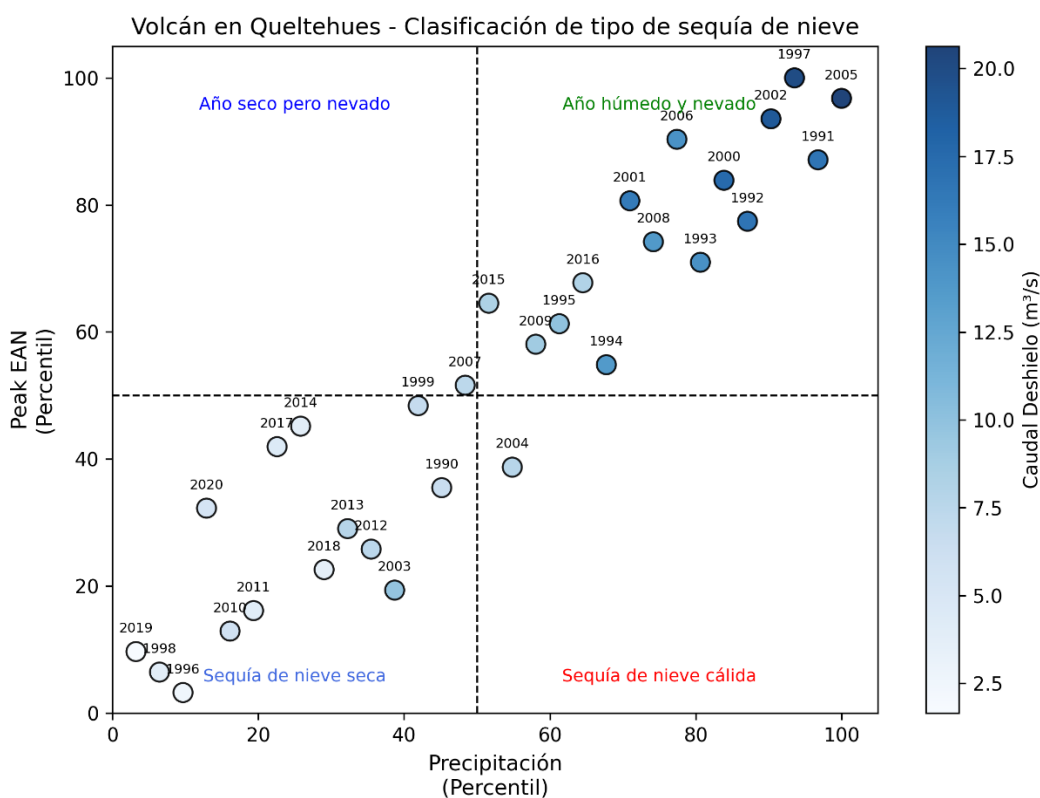


Figura 18. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Volcán en Queltehues.

6.1.4.4. Región de O'Higgins río Claro en hacienda las Nieves

En la siguiente cuenca se aprecia una mayor variabilidad con respecto a la clasificación según años hidrológicos, si bien predominan los años húmedos y nevados ($\approx 36\%$), con eventos como 1997 y 2002 con altos valores de peak EAN ($>P85$), precipitaciones elevadas ($>P90$) y caudales estacionales superiores a $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. También, los cuadrantes de sequía de nieve seca ($\approx 32\%$), sequía de nieve cálida y año seco pero nevado presentan una ocurrencia del 16% cada uno. Al igual que las cuencas anteriores, posterior al año 2009 se evidencia un predominio de años con baja cobertura nival, independiente de la precipitación efectiva, en sí es llamativo que en la última década han dominado ambas clasificaciones de sequía de nieve (seca y cálida) con 8 sobre 10 años posibles, tal y como se observa en la Figura 19 evidenciando la transición desde sistemas mayormente húmedos (1990-2005), a sistemas marcados por una disminución de su eficiencia hídrica-nival en los años posteriores.

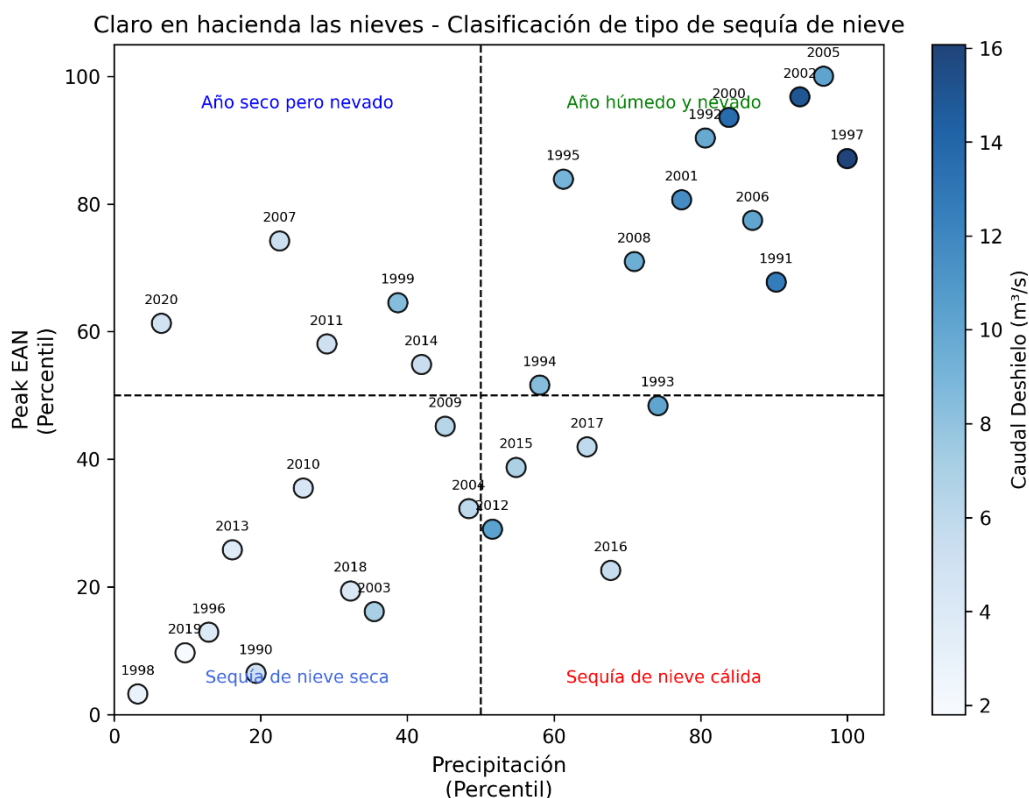


Figura 19. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Claro en hacienda Las Nieves.

6.1.4.5. Región de O'Higgins río Pangal en Pangal

El comportamiento de esta cuenca refleja la vulnerabilidad de sistemas elevados (3.071 m s.n.m.) frente a déficit de precipitaciones, sí bien predominan los años húmedos y nevados ($\approx 48\%$) dentro del periodo de estudio, estos se agrupan en su mayoría durante las década de 1990 y 2000, con eventos como 1997, 2002 y 2005 que concentran los mayores valores de peak EAN ($>P90$), alta precipitación ($>P90$) y caudales superiores a $32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no obstante los años clasificados como sequía de nieve seca ($\approx 45\%$) se concentran posterior a la segunda mitad de la década de 2000 y 2010, existen registros tanto de sequía

de nieve cálida (2012) y año seco pero nevado (2014), pero solo 1 evento de cada tipo y estos posteriores al 2010. Sí bien es la cuenca con el mayor valor promedio del peak EAN en el periodo de estudio 1070 mm/año (Figura 8), la misma evidencia una pérdida sostenida de eficiencia nival-hídrica en los últimos 15 años, con reducción tanto en la magnitud del almacenamiento como en el rendimiento estacional del caudal, tal y como se observa en la Figura 20.

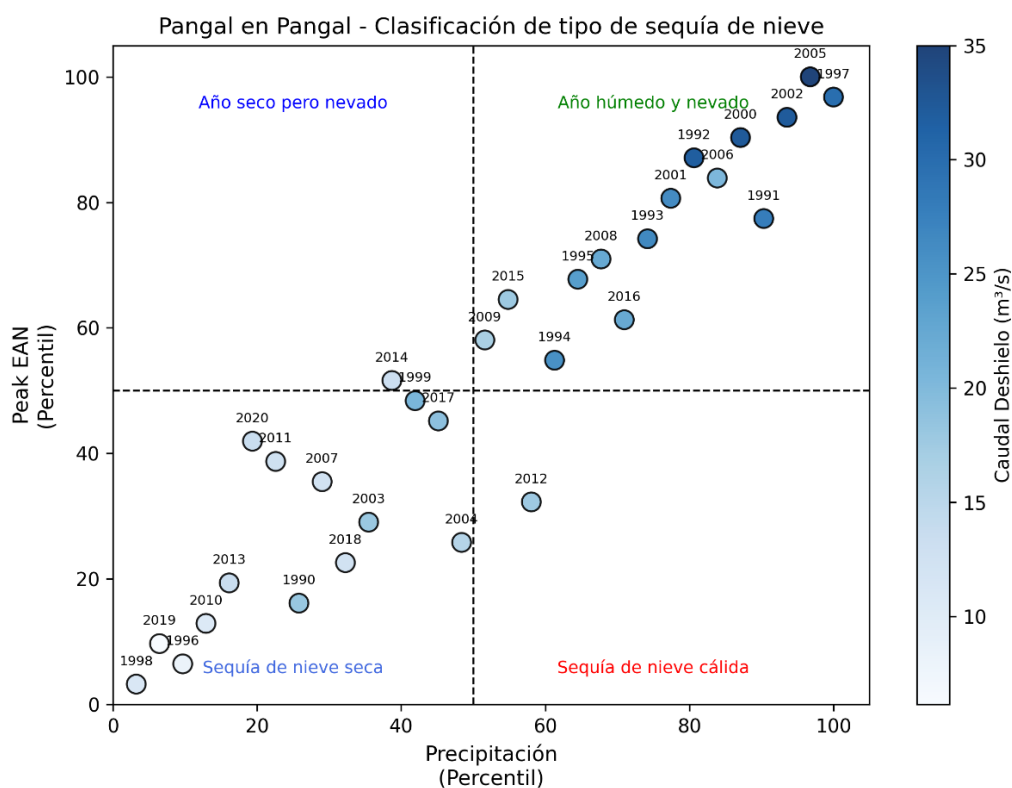


Figura 20. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Pangal en Pangal.

6.1.4.6. Región de O'Higgins río Tinguiririca en bajo Briones

Los años húmedos y nevados se concentran en su mayoría entre 1991 y 2008 ($\approx 42\%$), con un evento destacado en el año 2002 que presenta un peak EAN

por sobre el percentil 90, una alta precipitación ($>P90$) y el mayor caudal registrado ($>105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), al igual que las demás cuencas de esta región, se observa un aumento en las demás clasificaciones con la sequía de nieve seca ($\approx 39\%$) siendo la predominante en los últimos 15 años y a su vez casos como 2012 y 2016 corresponden a sequías cálidas, con precipitaciones cercanas al percentil 65 pero peak EAN bajo 40, asociados a caudales significativamente menores. También se registran eventos ubicados en el cuadrante seco pero nevado (2020), que conservan una moderada acumulación nival pese a la baja precipitación. En el período analizado en la Figura 21, la cuenca presenta una pérdida progresiva de años con mayor acumulación nival y a su vez un aumento en la frecuencia de eventos secos.

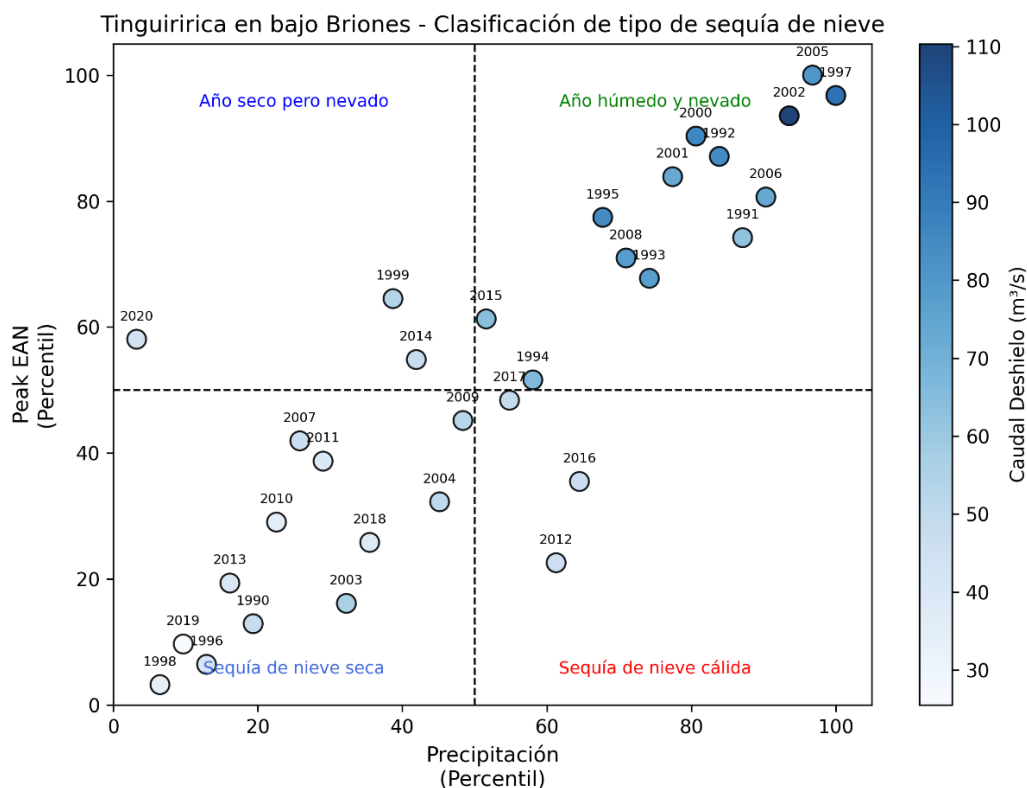


Figura 21. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Tinguiririca en Bajo Briones.

6.1.4.7. Región del Maule río Achibueno en la Recova

La primera cuenca correspondiente a la región del Maule presenta una distribución dispersa entre cuadrantes climáticos, aunque dominados por años húmedos y nevados, en especial durante la década del 2000 entre los cuales destacan 2002 y 2005 con percentiles altos en EAN y precipitación, y caudales de deshielo superiores a $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A partir de 2010 predominan los eventos de sequía de nieve seca, con casos como 2016 y 2019 que presentan simultáneamente baja precipitación ($<P_{20}$), bajo EAN y caudales inferiores a $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, reflejado en la Figura 22. A su vez varios años (5) ubicados en el cuadrante seco pero nevado, el año 2011 se sitúa como el más extremo en

acumulación nival (peak EAN) con respecto a esta clasificación (> P90) y precipitación ligeramente inferior a la mediana (> P40). En conjunto, el patrón evidencia una mayor variabilidad y fragmentación en el régimen nival de la cuenca, anterior a la década del 2010 a diferencia de las regiones Metropolitana y de O'Higgins.

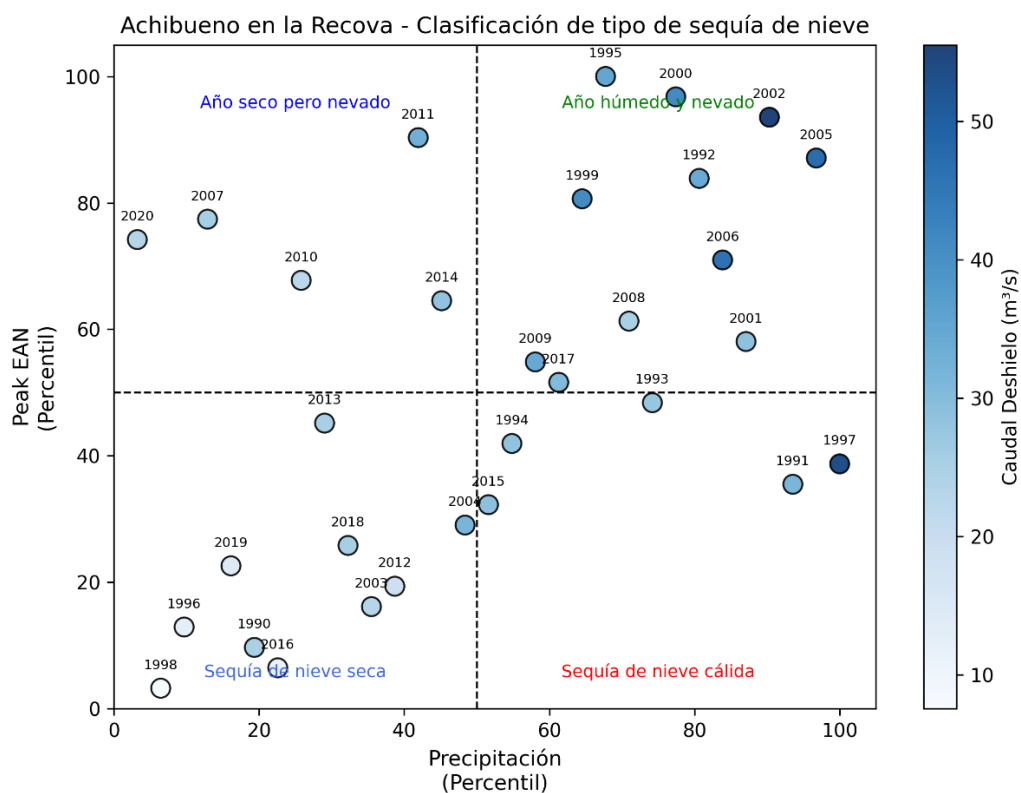


Figura 22. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Achibueno en La Recova.

6.1.4.8. Región del Maule río Longaví en la Quiriquina

Se observa claramente una transición hidrológica desde un régimen húmedo y nevado hacia condiciones más secas, entre las décadas de 1990 y 2000 el predominio del primer cuadrante es evidente, con eventos como 2000 y 2002 que presentan altos valores de EAN (> P90), elevada precipitación y caudales

superiores a $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Desde 2010 en adelante, se observa una concentración creciente de años en los cuadrantes seco pero nevado y sequía de nieve seca, representando más del 80% del total, con caudales de deshielo medios ($25\text{-}35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). No obstante registros previos como 1997 refleja que, a pesar de presentar baja acumulación nival, las elevadas precipitaciones reflejaron el mayor caudal del periodo ($> 50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), sin embargo, en los últimos 12 años, la tendencia de años secos ha reforzado una reducción sostenida entre la nieve acumulada y el caudal de deshielo, tal como se refleja en la Figura 23.

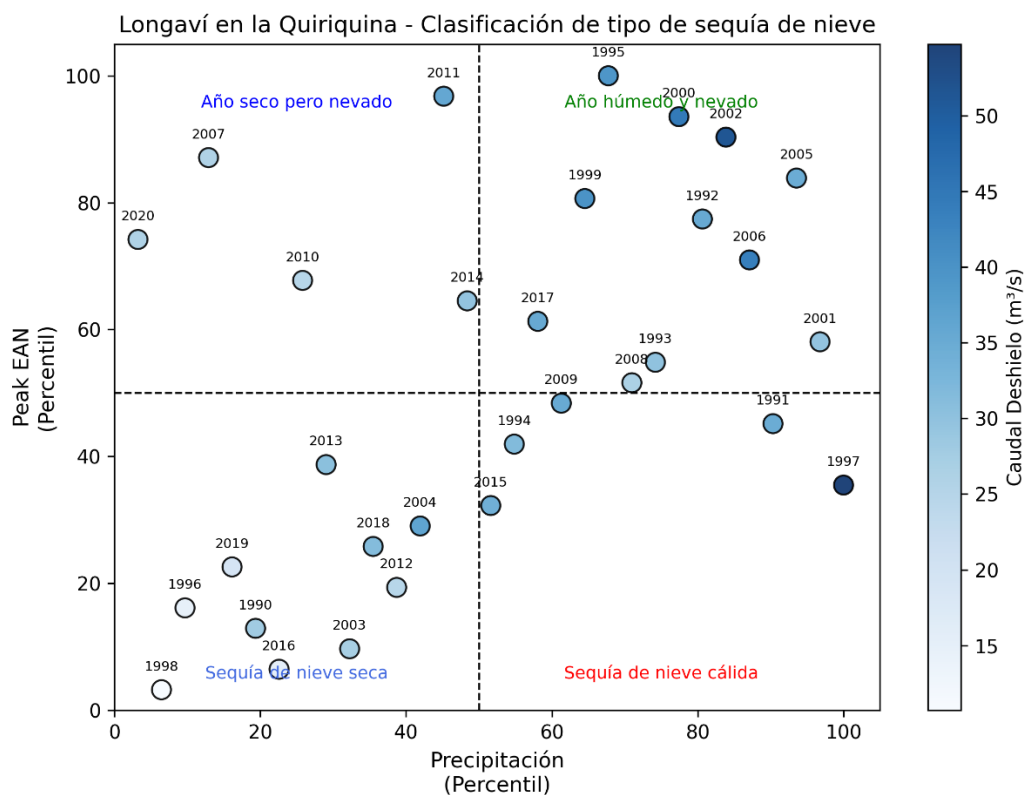


Figura 23. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Longaví en la Quiriquina.

6.1.4.9. Región del Maule río Teno antes junta con Claro

A partir de la Figura 24 se observa muestra una transición hidrológica evidente desde un régimen favorable hacia condiciones más secas. Durante los años 1997, 2002 y 2005 se observan altos valores de EAN y precipitación (> P90), junto con caudales de deshielo superiores a $90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, propios de un sistema eficiente. A partir de 2007, los años se concentran en los cuadrantes de sequía de nieve cálida y seca, con una reducción progresiva en la intensidad del caudal. Más del 50% de los años posteriores presentan acumulación y precipitación bajo percentil 50, con caudales por debajo de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El patrón refleja una pérdida de eficiencia nival, una creciente dispersión interanual, menor presencia de años húmedos y reducción sostenida en los caudales de deshielo.

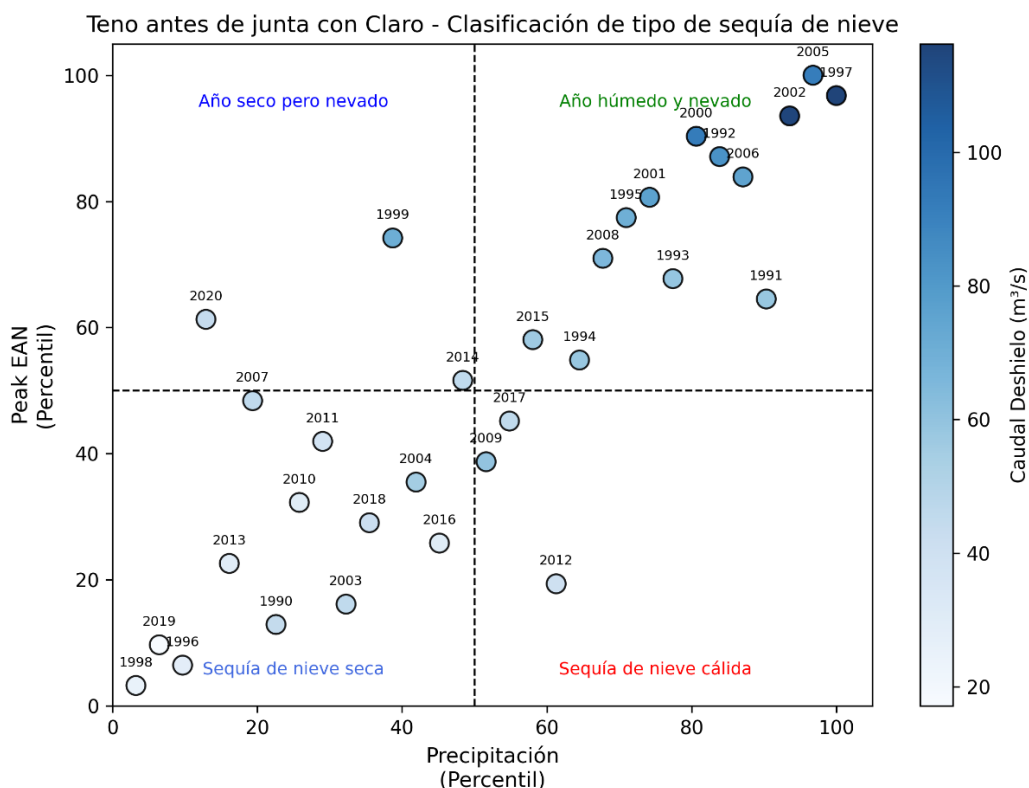


Figura 24. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Teno antes junta con Claro.

6.1.4.10. Región del Ñuble río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)

Se observa una distribución dispersa entre cuadrantes, al igual que en la región del Maule, si bien se encuentra bien distribuida entre los primeros 15 años (1990-2005), el predominio de años húmedos y nevados es evidente, específicamente en años como 2000 y 2002, que marcaron altos valores simultáneos de precipitación y peak EAN ($> P70$), acompañados por los mayores caudales del registro ($> 13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), reflejados en la Figura 25. A diferencia de la tendencia esperada los eventos de sequía de nieve cálida se originaron en la década de 1990, lo cual marca una clara diferencia con el

comportamiento de las cuencas en regiones de la zona centro (RM y VI), no obstante, desde 2010, la mayoría de los años ($\approx 81\%$) se clasifican en cuadrantes con poca precipitación ($<P50$), pero aun así caudales relativamente normales ($\approx 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). El periodo 2020-2021 sobresale por su peak EAN alto ($> P75$) a pesar de una precipitación baja ($< P10$), ubicándose como una excepción reciente. La cuenca revela un patrón de transición post-2010 hacia condiciones más secas, con mayor dispersión y menor frecuencia de eventos favorables para la acumulación nival.

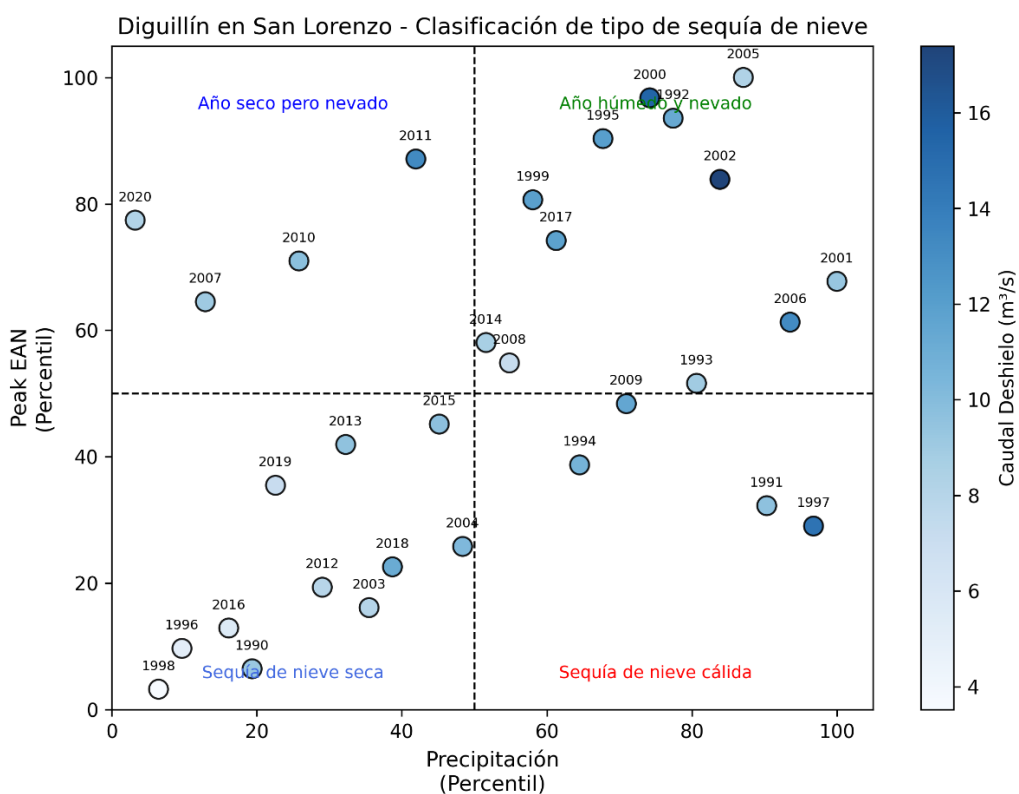


Figura 25. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Diguillín en San Lorenzo.

6.1.4.11. Región del Ñuble río Ñuble en San Fabián N°2

Al examinar el comportamiento de esta cuenca, reflejada en la Figura 26, muestra una distribución relativa con mayoría de años húmedos y nevados ($\approx 39\%$), así como sequías de nieve seca ($\approx 36\%$). Es evidente el comportamiento resiliente frente a condiciones mixtas, aunque la dispersión aumenta en los últimos 15 años. El año 2002 sobresale por su posición en el cuadrante húmedo y nevado con caudales que superan los $130 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y evidencian la capacidad de la cuenca en la acumulación nival y transformación en escorrentía. Llama la atención el evento de sequía de nieve cálida 1997 con alta precipitación ($>P80$) y peak EAN ($<P40$), que a pesar de aquello presenta uno de los mayores registros de caudal de deshielo ($>120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), mientras que en 1998 se presenta el evento de sequía de nieve seca, más extremo del registro, con peak EAN y precipitación ($<P10$) y caudales inferiores a $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. El patrón claro que sigue esta cuenca radica en la disminución de años favorables posterior al año 2010 y una tendencia a presentar menor caudal de deshielo, probablemente producto de una acumulación deficiente de nieve.

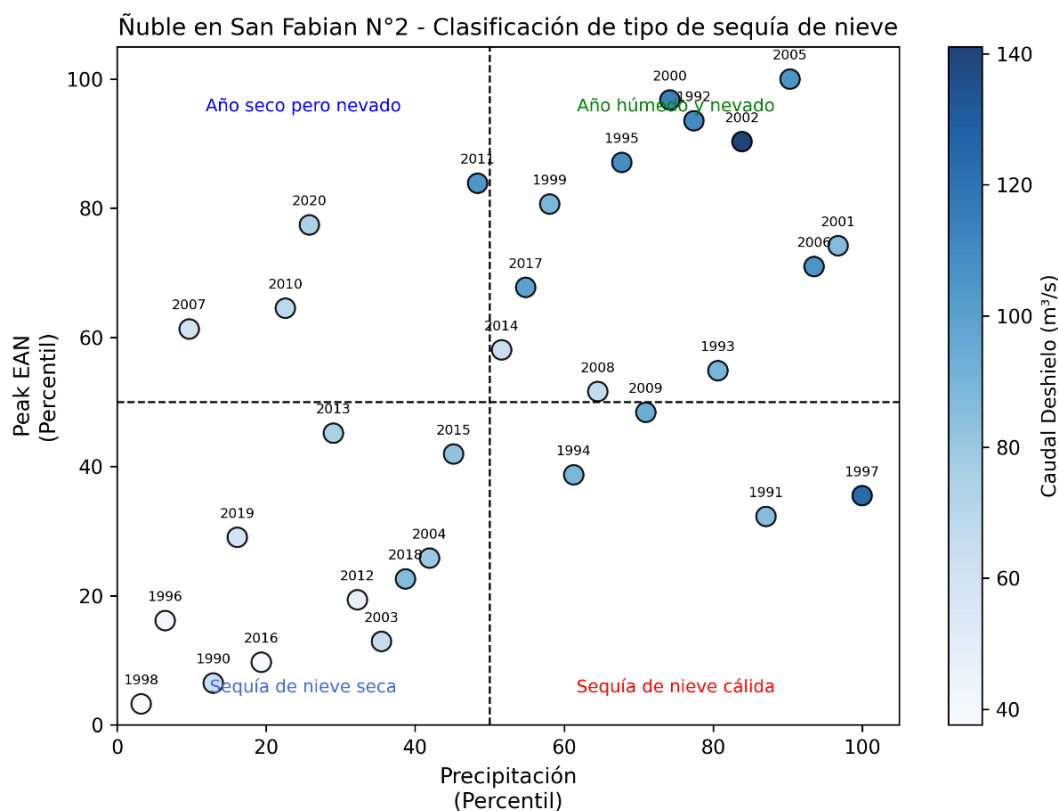


Figura 26. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Ñuble en San Fabián N°2.

6.1.4.12. Región del Ñuble río Renegado en Invernada

Los eventos de sequía de nieve cálida se ven presentes mayoritariamente en la década de 1990, especialmente en 1997 (PP > P80, EAN < P40 y Q > 4 m³ s⁻¹), en los que la acumulación sólida no responde a la magnitud de la precipitación. Los años húmedos y nevados predominan la década del 2000, siendo el año 2002 el que registra el mayor caudal histórico (> 5,5 m³ s⁻¹), sin ser necesariamente el registro con mayor cantidad de peak EAN o precipitación, mientras que posterior al 2010, predominan los eventos con baja precipitación y caudales estacionales entre 1 y 3 m³ s⁻¹. En la Figura 27 se observa que

posterior al año 2012, el caudal no superó los $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Consolidando una pérdida progresiva del régimen nival, producto de la menor cantidad de precipitaciones en la zona. Sí bien en los primeros 15 años (1990-2005), la cuenca presentó valores elevados de precipitación y caudal de deshielo, en la última década su respuesta hidrológica ha sido moderada, con caudales bajos y gran sensibilidad térmica. La menor escala y capacidad de retención de esta cuenca amplifican su vulnerabilidad frente al ascenso térmico observado.

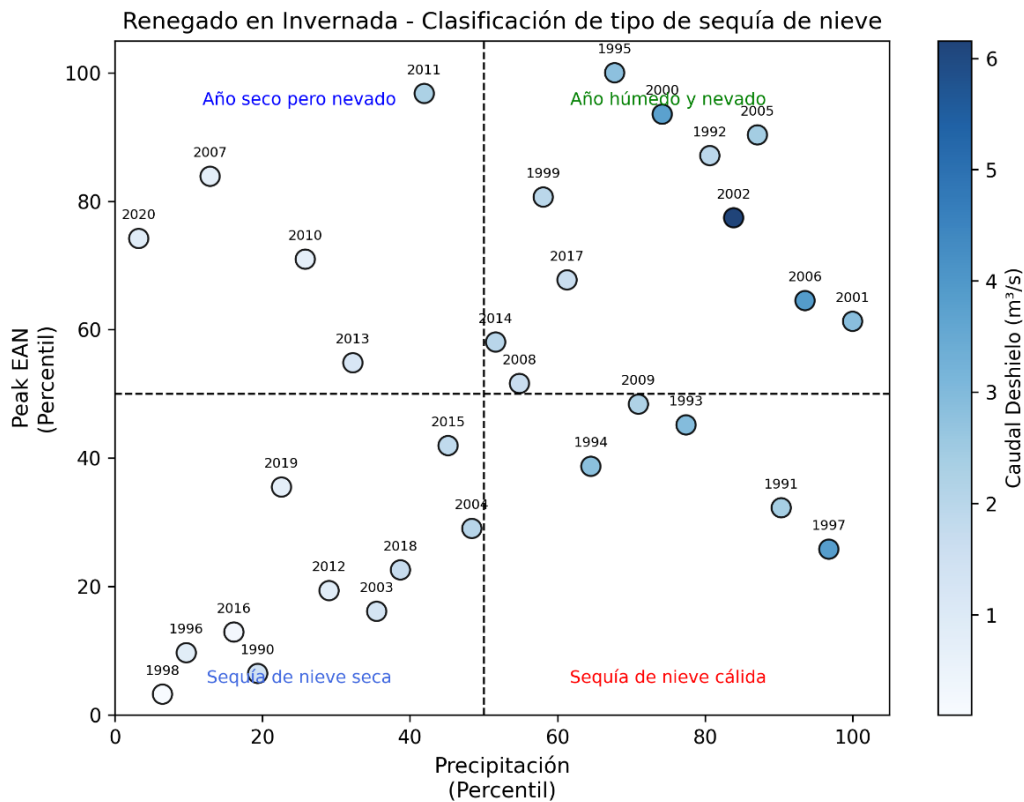


Figura 27. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Renegado en Invernada.

6.1.4.13. Región del Biobío río Duqueco en Villucura

La respuesta interanual se concentra mayormente en cuadrantes mixtos, con una tendencia decreciente en eventos húmedos y nevados tras 2010, tal y como se plasma en la Figura 28. Se observa un número relevante de eventos con un buen aporte nival, particularmente bajo condiciones térmicamente favorables. Diez años clasifican como húmedos y nevados, entre ellos 2005 y 2006, con peak EAN ($> P60$), precipitación ($> P80$) y caudales que superan los $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Nueve eventos, como 1996, 1998 y 2016, corresponden a sequías de nieve seca, con déficits evidentes y caudales $< 25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Los años 1991 y 1997 se destacan como sequías de nieve cálidas, con PP $> P80$ y peak EAN $< P40$, reflejando baja cobertura nival a pesar de la alta precipitación. A partir de 2010 ha aumentado la presencia de años secos, lo que sugiere una menor disponibilidad de precipitaciones, alta variabilidad en su cobertura nival y clara disminución de caudales de deshielo. Esta cuenca es menos susceptible a pérdida de manto nival, dado el carácter mayoritariamente pluvial de la zona sur.

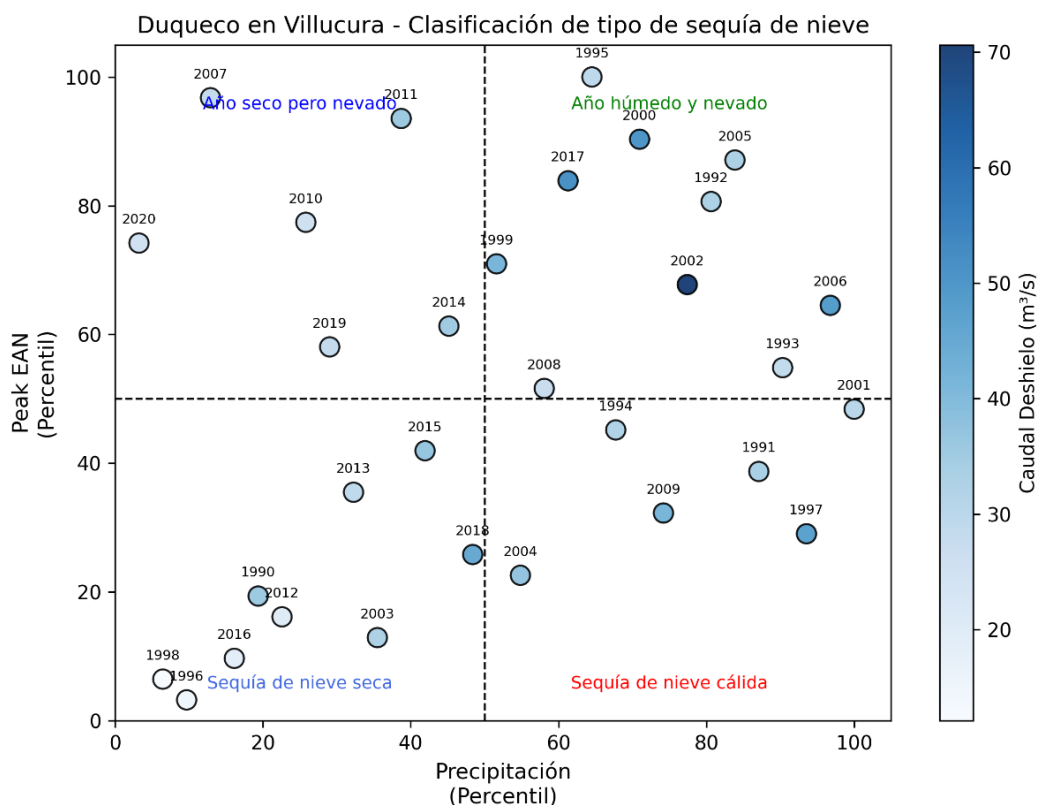


Figura 28. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Duqueco en Villucura.

6.1.4.14. Región del Biobío río Rucue en camino a Antuco

A partir de la Figura 29, se identifican múltiples años en que la acumulación nival adquiere relevancia bajo condiciones propias de la zona sur, históricamente esta cuenca ha tenido un comportamiento disperso, con pocos años consecutivos en una misma clasificación y un marcado comportamiento por décadas. La primera mitad de la década de 1990 presentó registro óptimos de precipitación y peak EAN (60%), mientras que la segunda mitad se caracterizó por eventos de sequía de nieve (cálida y seca). En la década del 2000 volvieron a presentarse años positivos, aunque no necesariamente reflejados por

caudales de deshielo elevados ($< 12,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Posterior al año 2010, la cuenca ha presentado intermitencia entre años marcados por sequías de nieve secas y últimamente años secos pero nevados. Los eventos destacados son 2008, 2012 y 2017, estos presentando los niveles más altos de caudal de deshielo ($> 20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), sin la necesidad de pertenecer a cuadrantes óptimos para este propósito. La presencia de los años 2008 y 2012 se explica dado que los años anteriores 2007 y 2011, presentaron los máximos en peak EAN ($> P90$), lo que debido al derretimiento del manto nival produjo los peaks de caudal.

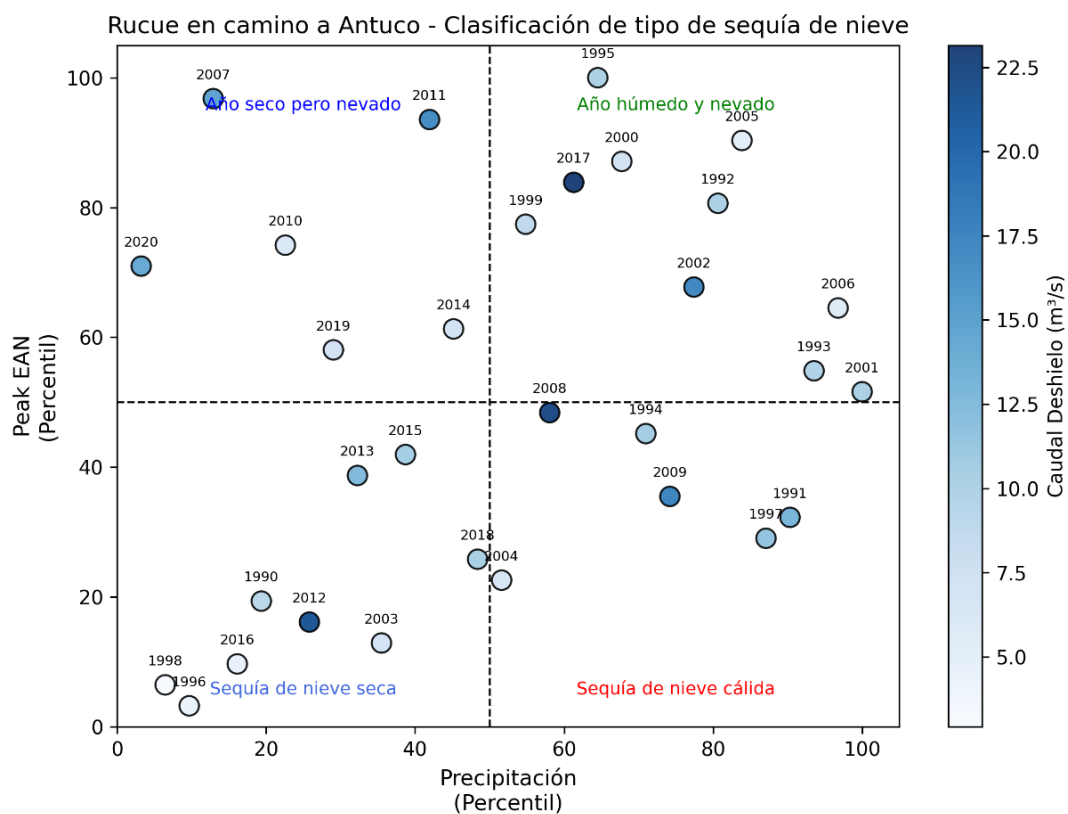


Figura 29. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Rucue en camino a Antuco.

6.1.4.15. Región del Biobío río Lonquimay antes de junta con Biobío

A pesar de su ubicación y potencial nival, la respuesta hidrológica se fragmenta entre los cuatro cuadrantes, como se observa en la Figura 30. Los años húmedos y nevados (29%), con PP y peak EAN > P80, y caudales que superan los $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (1993, 1995, 2005). Los eventos clasificados como sequía de nieve seca ($\approx 26\%$), incluyendo 1996 y 1998, con déficits combinados (PP y peak EAN < P10) y bajos caudales ($< 15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). La sequía de nieve cálida y año seco pero nevado con siete años cada uno, destacando el año 1994 que a pesar de la escasa acumulación nival, el caudal estacional se aproxima a $35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, lo que sugiere una eficiencia hidrológica impulsada por derretimiento de nieve depositada en años (1992-1993). Los tres máximos caudales (1994, 2002 y 2017) provienen de tres cuadrantes distintos, lo que evidencia la complejidad climática de la cuenca y su respuesta variable ante distintos eventos. La última década aumento en escenarios con poca precipitación y alta acumulación nival, generada posiblemente por descenso de isoterma en esta zona.

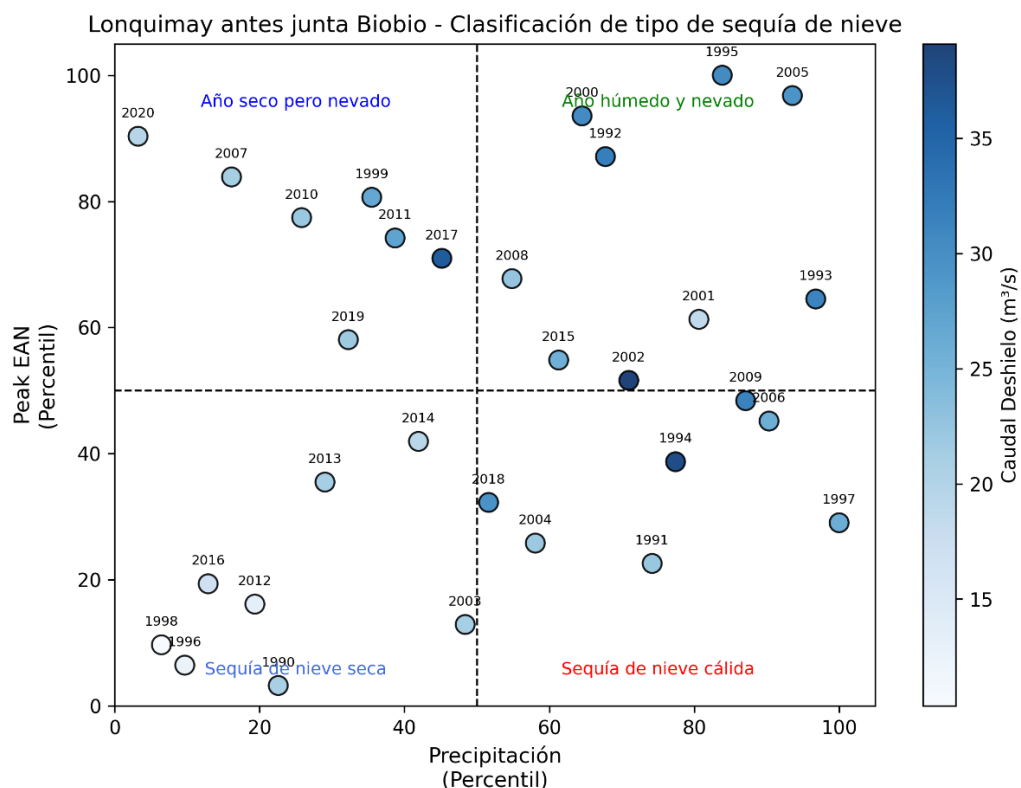


Figura 30. Gráfico de dispersión multivariable de clasificación climática en río Lonquimay antes junta con Biobío.

La clasificación detallada de las 15 cuencas y el análisis de su evolución temporal confirman la vulnerabilidad frente a los cambios y una transición climáticos clara a lo largo de la macrozona centro-sur de Chile, hacía sistemas con menor precipitación y caudal disponible.

Las cuencas de la región Metropolitana y de O'Higgins se caracterizan por una alta correlación histórica ($R^2 \geq 0.70$) entre el peak EAN y el caudal, lo que demuestra su fuerte dependencia del almacenamiento nival. Este comportamiento, si bien permitía prever su dinámica histórica, expone su falta de resiliencia ante la mega sequía. Los resultados demuestran una clara

desconexión entre la acumulación de nieve y el caudal un fenómeno que indica como el rol de la nieve como “embalse” natural está perdiendo su capacidad. Antes de 2010, los años con máximos caudales predominaban en el cuadrante “húmedo y nevado”. Sin embargo, posterior a 2010, 8 de 11 años (73%) fueron clasificados como sequía de nieve (cálida o seca) en la región de O’Higgins, lo que confirma un impacto claro y la vulnerabilidad de estos sistemas. En las cuencas del Maule, que actúan como áreas fluctuantes, predominan los eventos de sequía de nieve cálida que fueron frecuentes en la década de 1990, mientras que, posterior a 2010, 9 de 11 años (82%) se caracterizaron por una baja precipitación.

Esta alteración no es una simple anomalía, sino una tendencia sostenida que modifica el patrón estacional de escorrentía, volviéndolo más irregular y volátil. La dependencia de la nieve expone a estas regiones a graves implicaciones en la calidad de vida, aumento de la vulnerabilidad y peor salud (Vüllrath et al., 2022), así como a riesgos económicos por la dificultad para mantener operaciones agrícolas (CR2, 2019).

A diferencia de la zona central, las cuencas del sur presentan una dinámica más compleja y muestran menor dependencia de la nieve, lo que se refleja en una baja correlación ($R^2 \leq 0,56$). El comportamiento es disperso, como se observa en cuencas como Lonquimay y Rucue, donde los máximos caudales se concentran en tres tipos de clasificación diferentes.

Los resultados confirman que esta variación avanza de norte a sur, impactando progresivamente la funcionalidad del régimen nival. La creciente frecuencia de

las sequías de nieve en la macrozona centro-sur resalta la vulnerabilidad de las cuencas a los cambios climáticos (IPCC, 2014).

6.2. Discusión

El análisis evidencia que el régimen nival ha experimentado una transformación clara en los últimos 31 años, coincidiendo con la sequía más extensa e intensa en Chile central (Serrano-Novitoli et al., 2020), influenciada por la variabilidad natural y el reforzamiento antropogénico (Garreaud et al., 2019).

La evidencia indica una disminución sostenida del peak EAN, con reducciones superiores al 40% en cuencas clave como Yerba Loca, Tinguiririca y Achibueno desde la década del 2010. Este fenómeno no solo implica una reducción del volumen de nieve acumulada, sino también un cambio en la forma en que el manto nival contribuye al caudal estacional. Paralelamente, la variabilidad interanual de los caudales de deshielo debilita la función reguladora, marcando la pérdida de la capacidad de amortiguar la variabilidad climática a través de la acumulación sólida (Notarnicola, 2022). Cerca de la mitad de los años analizados corresponden a condiciones de déficit de nieve, en su mayoría sequías de nieve secas, escenario que reduce simultáneamente el volumen total y la eficiencia de la regulación hídrica.

La respuesta regional es polarizada, en la zona central la señal dominante es la polarización hacia años extremos (punto de quiebre post-2010), mientras que en las cuencas del sur la creciente prevalencia de precipitaciones líquidas anticipa un régimen mayoritariamente pluvial, la consecuencia inmediata es un

desacople entre el ciclo de acumulación y deshielo. Esta situación compromete la seguridad hídrica urbana y agrícola en cuencas de alta dependencia nival.

La urgencia del escenario demanda la adopción de estrategias de gestión adaptativas. Esto incluye el rediseño de la operación de embalses para captar los aportes líquidos invernales, la tecnificación del riego en zonas agrícolas y la protección de cabeceras de cuencas estratégicas (Crespo et al., 2020). Los hallazgos se alinean con reportes internacionales que documentan la degradación de los sistemas nivales en otras zonas cordilleranas. La escasez de nieve y la reducción sistemática del periodo nival se observan en los Alpes (Carrer et al., 2023; Dumont et al., 2025), mientras que en Norteamérica se acuñó el concepto de snow drought (sequía de nieve) para explicar la desaparición de inviernos nivales confiables (Harpold et al., 2017). Esta tendencia global refuerza que lo observado en Chile no es un fenómeno aislado, sino parte de una tendencia global hacia la disminución de la criósfera (Immerzeel et al., 2019).

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones metodológicas, el uso de ERA5-Land (9x9 km de resolución espacial) que subestima la heterogeneidad orográfica, y la regla del 10% de cobertura por píxel, si bien útil, introduce un criterio arbitrario. Además, la escasez de datos in situ y actualizados en alta montaña limita la extrapolación de los resultados más allá del periodo analizado. A futuro, la investigación debiera avanzar hacia la aplicación de downscaling dinámico climático acoplado con modelación nival de base física y alta resolución espacial, además de incorporar validación

sistemática con observaciones satelitales (MODIS, Sentinel) e in-situ. Tal desarrollo aportara herramientas prácticas para la toma de decisiones en un contexto donde la degradación del régimen nival es cada vez más evidente.

7. CONCLUSIONES

La investigación ha arrojado resultados que demuestran una transición hidrológica en la macrozona centro-sur de Chile, caracterizada por el deterioro del régimen nival y muestra que existe una relación robusta entre los tipos de sequías de nieve y los caudales de deshielo. Se presentan dos ejes que se destacan de la dinámica hidrológica en las cuencas en estudio:

- Variabilidad espacio-temporal y asimetría de las sequías de nieve: Se identificó una transformación estructural del régimen nival. La zona central experimentó una ruptura post mega sequía del año 2010, marcada por la drástica disminución de años húmedos y nevados, siendo reemplazados por eventos de sequías de nieve secas, y eventos térmicamente anómalos. La zona sur, por el contrario, mostró una mayor resiliencia, aunque con una alta variabilidad, evidenciando que el patrón de la mega sequía es asimétrico y que cada cuenca es un mundo diferente.
- Relación entre Clasificación Climática y Caudales de Deshielo: Se confirma que la clasificación de sequias es un indicador robusto de la eficiencia nival-hídrica. Aunque la alta eficiencia se mantiene en cuencas de alta montaña (ej. Volcán en Queltehue o Pangal en Pangal). El desacople crítico entre el peak EAN y el caudal domina en la mayoría de las cuencas, donde el cambio hacia un régimen mayoritariamente pluvial es cada vez más evidente.

Los resultados de este estudio tienen implicaciones para la gestión del agua y la seguridad hídrica. La pérdida del control nival sobre los caudales demuestra que los modelos de pronósticos que no incorporan de manera explícita las dinámicas de acumulación y derretimiento de nieve son poco confiables y sujetos a errores significativos. En este sentido, se proponen las siguientes recomendaciones.

- Fortalecimiento del Monitoreo: Es fundamental fortalecer las redes de monitoreo del EAN y precipitación en la alta montaña mediante redes nivales in-situ y satelitales, otorgando mayor robustez a las decisiones en tiempo real y permitiendo un mejor diagnóstico de los procesos nivales.
- Investigación Futura: El desarrollo de modelos predictivos basados en procesos y apoyados en inteligencia artificial, además de la incorporación de downscaling atmosféricos permitirían mejorar la resolución espacial de las estimaciones y proyectar tendencias en un contexto de cambio climático.

Este estudio presenta una metodología replicable que explica parte de la transformación actual del régimen nival de Chile centro-sur. La información proporcionada apoya la gestión sostenible de los recursos hídricos, destacando la prioridad de mejorar nuestro entendimiento de estos complejos sistemas hidrológicos de montaña a lo largo del país.

8. LITERATURA CITADA

- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., ... & McPhee, J. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., and Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile, *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 429–446. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Blanco, G., Billi, M., Nicolas-Artero, C., Maillet, A., Aldunce, P., Urrutia-Jalabert, R., Zambrano-Bigiarini, M., Guevara, G., Galleguillos, M., Muñoz, A., Christie, D., Marinao, R., & Garreaud, R. (2023). *Seguridad Hídrica en Chile: Caracterización y Perspectivas de Futuro*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (ANID/FONDAP/1522A0001), 72 pp. Disponible en www.cr2.cl/seguridadhidrica
- Araya Ojeda, M., & Isla, F. I. (2016). Variabilidad hidrológica en la región del Biobío: los eventos El Niño en zonas templadas de Chile. *Revista Universitaria de Geografía*, 25(1), 31–55. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383246150003>

- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/s-1.00382-020-05231-4>
- Arumí, José Luis, Rivera, Diego, Muñoz, Enrique, & Billib, Max. (2012). Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Biobío de Chile. *Obras y proyectos*, (12), 4-13. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132012000200001>
- Báez-Villanueva, O., Zambrano-Bigiarini, M., Verbist, K., Espinoza-Dávalos, G. E., Poblete-Caballero, C., & Nauditt, A. (2024). Hydrological regime classification in Chile: A comprehensive analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(6), 1415–1432. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1415-2024>
- Ballari, D. (s.f.). *Geomorfometría básica con WhiteboxTools* [Publicación en línea]. RPubS. https://rpubs.com/daniballari/geomorfometria_wbx
- Banco Central de Chile. (2024). *Informe de Cuentas Nacionales 2023*. <https://www.bcentral.cl/areas/estadisticas/cuentas-nacionales-anuales>
- Barnett, T., Adam, J., & Lettenmaier, D. (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>
- Barría, P., Chadwick, C., Ocampo-Melgar, A. et al. (2021). Water management or megadrought: what caused the Chilean Aculeo Lake drying?. *Reg Environ Change* 21, 19. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01750-w>

- Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D., ... & Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1), 74. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- Boisier, J. P. (2023). *CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile* (Version 2.5) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>
- Caro, A., Condom, T., Rabatel, A., Champollion, N., García, N., & Saavedra, F. (2024). Hydrological response of Andean catchments to recent glacier mass loss. *The Cryosphere*, 18(5), 2487–2507. <https://doi.org/10.5194/tc-18-2487-2024>
- Caro, A., Condom, T., Rabatel, A., Champollion, N., García, N., & Saavedra, F. (2025). Future glacio-hydrological changes in the Andes: a focus on near-future projections up to 2050. *Scientific Reports*, 15, 10991. <https://doi.org/10.1038/s1.41598-025-88069-2>
- Carrasco, J. F., Casassa, G., Pizarro, R., & Saravia Lopez de Castilla, M. (2011). Impactos del Cambio Climático, Adaptación y Desarrollo en las Regiones Montañosas de América Latina. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2926.6804>
- Carrer, M., Dibona, R., Prendin, A.L. (2023) *et al.* Recent waning snowpack in the Alps is unprecedented in the last six centuries. *Nat. Clim. Chang.* **13**, 155–160. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01575-3>

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2015). *Informe a la Nación:*

La mega sequía 2010-2015, una lección para el futuro.

<https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2024). *Catastro*

Frutícola 2024 (En conjunto con la Oficina de Estudios y Políticas

Agrarias (ODEPA)). <https://www.ciren.cl/proyectos/catastros/catastro-fruticola/>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2012). *La economía del*

cambio climático en Chile. Naciones Unidas.

<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/35372>

Copernicus Climate Data Store. (s.f.). ERA5-Land hourly data from 1950 to

present. [https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-](https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview)

[land?tab=overview](https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview)

Cordero, R.R., Feron, S., Damiani, A. et al. Rapid decline in extratropical

Andean snow cover driven by the poleward migration of the Southern

Hemisphere westerlies. *Sci Rep* 14, 26365 (2024).

<https://doi.org/10.1038/s-1.41598-024-78014-0>

- Cornwell, E., Molotch, N. P., & McPhee, J. (2016). Spatio-temporal variability of snow water equivalent in the extra-tropical Andes Cordillera from distributed energy balance modeling and remotely sensed snow cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), 411–430. <https://doi.org/10.5194/hess-20-411-2016>
- Coumerme González, D. (2021). *Caracterización de eventos meteorológicos extremos en la parte alta del río Maipo, Chile: Efecto de eventos de lluvia sobre nieve y proyecciones por cambio climático* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico U. de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181685>
- Crespo, S. A., Lavergne, C., Fernandoy, F., Muñoz, A. A., Cara, L., & Olfos-Vargas, S. (2020). Where Does the Chilean Aconcagua River Come from? Use of Natural Tracers for Water Genesis Characterization in Glacial and Periglacial Environments. *Water*, 12(9), 2630. <https://doi.org/10.3390/w12092630>
- DeWalle, D. R., & Rango, A. (2008). Principles of snow hydrology. *Cambridge University Press*.
- Dirección General de Aguas. (1987). *Balance hídrico nacional*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Dirección General de Aguas. (2014). *Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel nacional*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26406>

- Dirección Meteorológica de Chile. (2020). *Variabilidad Climática en Chile Central: Implicancias para los Recursos Hídricos*.
<https://climatologia.meteochile.gob.cl/publicaciones/publicacionCambioClimatico/publicacionCambioClimatico202012011.pdf>
- Dirección General de Aguas. (s.f.). *Banco Nacional de Aguas – Reportes Hidrométricos*. Ministerio de Obras Públicas de Chile.
<https://snia.mop.gob.cl/bnaConsultas/reportes>
- Dumont, M., Monteiro, D., Filhol, S., Gascoin, S., Marty, C., Hagenmuller, P., Morin, S., Choler, P., & Thuiller, W. (2025). The European Alps in a changing climate: physical trend and impact. *Comptes Rendus. Géoscience – Sciences de la Planète*, 357, 25-42.
<https://doi.org/10.5802/crgeos.288>
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Carcaci, H., Rabatel, A., Berthier, M., Descloitres, J., & Wagnon, P. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802–808.
<https://doi.org/10.1038/s1.41561-019-0432-5>
- Escenarios Hídricos 2030. (2021). *Gobernanza desde las Cuencas: Institucionalidad para la Seguridad Hídrica en Chile*. Recuperado de
<https://escenarioshidricos.cl/publicacion/gobernanza-desde-las-cuencas-institucionalidad-para-la-seguridad-hidrica-en-chile-2/>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2012). *Climate change guidelines for forest managers*. FAO Forestry Paper 172. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/afd0e42b-70be-4a01-a5d2-2e27d978fa92/content>
- Fuenzalida, P. (2023, 6 de julio). *Cambio climático e inundaciones: Llueve ahí donde nevaba*. CIPER Chile. Recuperado de: <https://www.ciperchile.cl/2023/07/06/cambio-climatico-e-inundaciones-llueve-ahi-donde-nevaba>
- Gajardo, J., Yáñez, M., Padilla, R., Espinoza, S., & Carrasco-Benavides, M. (2025). Modeling the Spatial Distribution of Wildfire Risk in Chile Under Current and Future Climate Scenarios. *Fire*, 8(3), 113. <https://doi.org/10.3390/fire8030113>
- Garreaud, R., & Rutllant, J. (2009). Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993. *Atmósfera*, 9(4). <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8405>
- Garreaud, R., Falvey, M., & Montecinos, A. (2016). Orographic precipitation in coastal Southern Chile: Mean distribution, temporal variability, and linear contribution. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4), 1185–1202. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0170.1>

- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso-Águila, 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>
- Glasner Vivanco, L. (2022). *Eventos hidrometeorológicos de lluvia sobre nieve en los Andes de Chile Central*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188859>
- Gómez-Mejía, P. A., & Rincón-Burbano, J. J. (2015). Gestión y valor económico del recurso hídrico. *Revista de Finanzas y Política Económica*, 7(2), 241–254. <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2015.7.2.4>
- Harpold, A. A., Dettinger, M., & Rajagopal, S. (2017). Defining snow drought and why it matters. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 98.
- Hatchett, B. J., Rhoades, A. M., & McEvoy, D. J. (2022). Monitoring the daily evolution and extent of snow drought. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(3), 869–890. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-869-2022>

- Henríquez, Cristián, Aspee, Nicolle, & Quense, Jorge. (2016). Zonas de catástrofe por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgo climático. *Revista de geografía Norte Grande*, (63), 27-44. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000100003>
- Hernández-Duarte, A. G., Sepúlveda, J. P. F., Contreras Figueroa, V. I., Saud Valero, F. R., & Saavedra Pimentel, F. A. (2021). 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. *Boletín de Estudios Geográficos*, (116), 123–155. <https://doi.org/10.48162/rev.40.010>.
- Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M. et al. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature* **577**, 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C: Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza.*

- IPCC, (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lapides, D., Hahm, W. J., Rempe, D. M., & Dralle, D. N. (2022). Causes of Missing Snowmelt Following Drought. *Water Resources Research*, 58(10), e2022WR032123. <https://doi.org/10.1029/2022WR032123>
- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C. E., & Moggiano, N. (2021). Climate change in the andes and its impact on agriculture: a systematic review. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. <https://doi.org/10.17268s-1.ci.agropecu.2021.012>
- Mardones Bascuñan, P. B., Garreaud Salazar, R., & Universidad de Chile. Departamento de Geofísica. (2019). *Impactos del cambio climático en la altura de la isoterma 0°C sobre Chile Central [recurso electrónico]*. Tesis (magíster en meteorología y climatología)--Universidad de Chile, 2019.
- M. Masiokas, R. Villalba, B. Luckman, D. Christie, E. Betman, C. Le Quesne, M. Prieto (2013). Recent and historic Andean snowpack and streamflow variations and vulnerability to water shortages in Central Chile and Central-western Argentina. *Climate vulnerability* 5(1), 213-227. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00522-0>

- 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. *Frontiers in Earth Science*, 8, 99. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- 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>
- Miranda Cepeda, B. (2022). *Aplicación de un método de determinación y validación de altura de isoterma 0°C en el territorio chileno, a partir de datos de radiosonda en el período 1973-2017* [Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/171023>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

Nania, L. (s.f.). *Manual básico HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1* [Manual].

Universidad de Granada. Recuperado de

[https://www.ugr.es/~lnania/private/ManualBasico HEC-HMS300 HEC-GeoHMS11 Espanol.pdf](https://www.ugr.es/~lnania/private/ManualBasico_HEC-HMS300_HEC-GeoHMS11_Espanol.pdf)

Notarnicola, C. Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982–2020. *Sci Rep* **12**, 13731 (2022).

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-16743-w>

Observatorio de Recursos Hídricos de La Araucanía Kimün-Ko. (s.f.).

Hidrografía. Kimün-Ko. Recuperado de

<https://kimunko.ufro.cl/hidrografia/#fnref:22>

OMM, 2019: Reglamento técnico de la Organización Meteorológica Mundial (OMM N°49) 2019. *Volumen 1*.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

(2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. FAO.

<https://www.fao.org/4/i3015s/i3015s.pdf>

Pabón-Caicedo JD, Arias PA, Carril AF, Espinoza JC, Borrel LF, Goubanova K,

Lavado-Casimiro W, Masiokas M, Solman S and Villalba R (2020)

Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. *Front.*

Earth Sci. 8:61. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061>

Pica-Téllez, A.; Garreaud, R.; Meza, F.; Bustos, S.; Falvey, M.; Ibarra, M.; Duarte, K.; Ormazábal, R.; Dittborn, R. & Silva, I.; (2020). Informe Proyecto ARClím: *Atlas de Riesgos Climáticos para Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago, Chile.

Riffo Luco, A., Peñas Silva, F., & Muñoz Ortiz, E. (2017). *Clasificación de los regímenes de caudales naturales en los ríos de Chile*. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Rubio-Álvarez, E., & McPhee, J. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. *Water Resources Research*, 46(W05514). <https://doi.org/10.1029/2009WR007982>

Santibáñez, F. (2017). *Atlas agroclimático de Chile. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule*. Universidad de Chile – FIA.

Santibáñez, F. (2017). *Atlas agroclimático de Chile. Tomo IV: Regiones Del Biobío y de la Araucanía*. Universidad de Chile – FIA.

- Saud Valero, F. R. (2020). *Evolución espaciotemporal de la cobertura de nieve de las cuencas de alta montaña entre los 29° S - 37° S mediante el uso de imágenes satelitales y su influencia en el caudal* [Tesis de pregrado, Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería].
- Serrano-Novitoli, R., Sarricolea, P., Fuentealba, M., Hernández-Mora, M., de la Barrera, F., Smith, P., Meseguer-Ruiz, Ó. (2020). Recent wildfires in central Chile: Detecting links between burned áreas and population exposure in the wildland urban interface. *Science of the total environment*, 706 (2020) 135894. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135894>
- Scaff, L., Rutllant, J. A., Rahn, D., Gascoïn, S., & Rondanelli, R. (2017). Meteorological interpretation of orographic precipitation gradients along an Andes west slope basin at 30 S (Elqui Valley, Chile). *Journal of Hydrometeorology*, 18(3), 713-727. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0073.1>
- Schirrwagen, J., & Baglioni, M. (2018). *OpenAIRE Guidelines for institutional and thematic repository managers 4.0 (4.0.0)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1299203>
- Sommer, C., Malz, P., Seehaus, T.C. *et al.* (2020). Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. *Nat Commun* 11, 3209. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16818-0>

- Stehr, A., & Aguayo, M. (2017). Snow cover dynamics in Andean watersheds of Chile (32.0–39.5° S) during the years 2000–2016. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(10), 5111–5126. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5111-2017>
- Stewart, I. (2009). Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydrological Processes*, 23(1), 78-94. <https://doi.org/10.1002/hyp.7128>
- Torres Abarca, P. (2016). *Visualización de mallas de terreno e identificación de patrones de orientación mediante sistemas de información geográfica (SIG)* [Memoria de título, Universidad de Chile]. Repositorio Académico U. de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/133027/Visualizacion-de-mallas-de-terreno-e-identificacion-de-patrones-de....pdf>
- Ulloa Palominos, G. (2020). *Evolución temporal de albedo en función de la variabilidad climática en glaciares de Los Andes semiáridos, zona Central de Chile* [Memoria para optar al título de Geóloga, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173930>

Unión Temporal de Proveedores Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros Ltda. (2017). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Volumen I: Informe final.* CIREN.

https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/20.500.13082/32735/1/DGA_2017_estimacion_demanda_actual_recursos_hidricos_Chile_Vol_I.pdf

Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Lagos-Zúñiga, M., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2025). Robust spatial changes in climate classes: insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters*, 20(1), 014061. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad9d5b>

Viale, M., & Garreaud, R. (2015). Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 10373–10387. <https://doi.org/10.1002/2014JD023014>

Villegas Tapia, J. (2022). *Pronóstico de la distribución espacial del SWE usando el modelo CRHM y un marco de asimilación de productos satelitales y forzantes del modelo: Aplicación en la cuenca alta del río Tinguiririca, Chile* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Hidráulico, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185564>

- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(W07447). <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>
- Vüllrath Ramírez, Antonia, Arrate Vollrath, Antonia, Madariaga Araya, Paloma, & Pulgar Galaz, Claudio. (2022). Sequía y calidad de vida en zona urbano-rural según grupos vulnerables y profesionales de salud. *Ciencia y enfermería*, 28, 2. Epub 25 de marzo de 2022. <https://dx.doi.org/10.29393/ce28-2scac40002>
- Welz, Juliane, & Krellenberg, Kerstin. (2016). Vulnerabilidad frente al cambio climático en la Región Metropolitana de Santiago de Chile: posiciones teóricas versus evidencias empíricas. *EURE (Santiago)*, 42(125), 251-272. <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612016000100011>

9. ANEXOS Y APENDICES

Tabla 9. Factores geo climáticos de las regiones en estudio

Regiones de estudio	Designación	Densidad poblacional	Superficie total (km ²)	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media (°C)
Metropolitana	RM	7.400.741	15.403,2	278	13,9
O'Higgins	VI	987.228	16.387	444	14,7
Maule	VII	1.123.008	30.296,1	595,9	13,8
Ñuble	XVI	512.289	13.178,5	936,4	13,5
Bio-bio	VIII	1.613.059	23.890,2	984,2	12,9

Tabla 10. Cuadro resumen de las cuencas analizadas zona centro

Cuenca	Región	Coordenadas			
		North	West	East	South
Estero Yerba Loca antes de junta con San Francisco	Metropolitana	-33.17	-70.36	-70.21	-33.35
Río Mapocho en Los Almendros	Metropolitana	-33.10	-70.45	-70.18	-33.49
Río Volcán en Queltehues	Metropolitana	-33.65	-70.21	-69.86	-33.96
Río Claro en hacienda Las Nieves	O'Higgins	-34.45	-70.73	-70.47	-34.61
Río Pangal en Pangal	O'Higgins	-34.24	-70.36	-70.06	-34.30
Río Tinguiririca en bajo los Briones	O'Higgins	-34.59	-70.83	-70.25	-35.01
Río Achibueno en la Recova	Maule	-35.94	-71.45	-71.02	-36.24
Río Longaví en la Quiriquina	Maule	-36.18	-71.46	-71.11	-36.47
Río Teno después de junta con Claro	Maule	-34.88	-70.86	-70.36	-35.28

Tabla 11. Cuadro resumen de las cuencas analizadas zona sur

Cuenca	Región	Coordenadas			
		North	West	East	South
Río Diguillin en San Lorenzo (Atacalco)	Ñuble	-36.87	-71.60	-71.33	-37.06
Río Ñuble en San Fabián N°2	Ñuble	-36.36	-71.53	-71.01	-36.98
Río Renegado en Invernada	Ñuble	-36.84	-71.64	-71.37	-36.93
Río Duqueco en Villucura	Biobío	-37.38	-72.04	-71.35	-37.65
Río Lonquimay antes junta con Biobío	Biobío	-38.34	-71.59	-71.23	-38.68
Río Rucue en camino a Antuco	Biobío	-37.34	-71.80	-71.44	-37.51

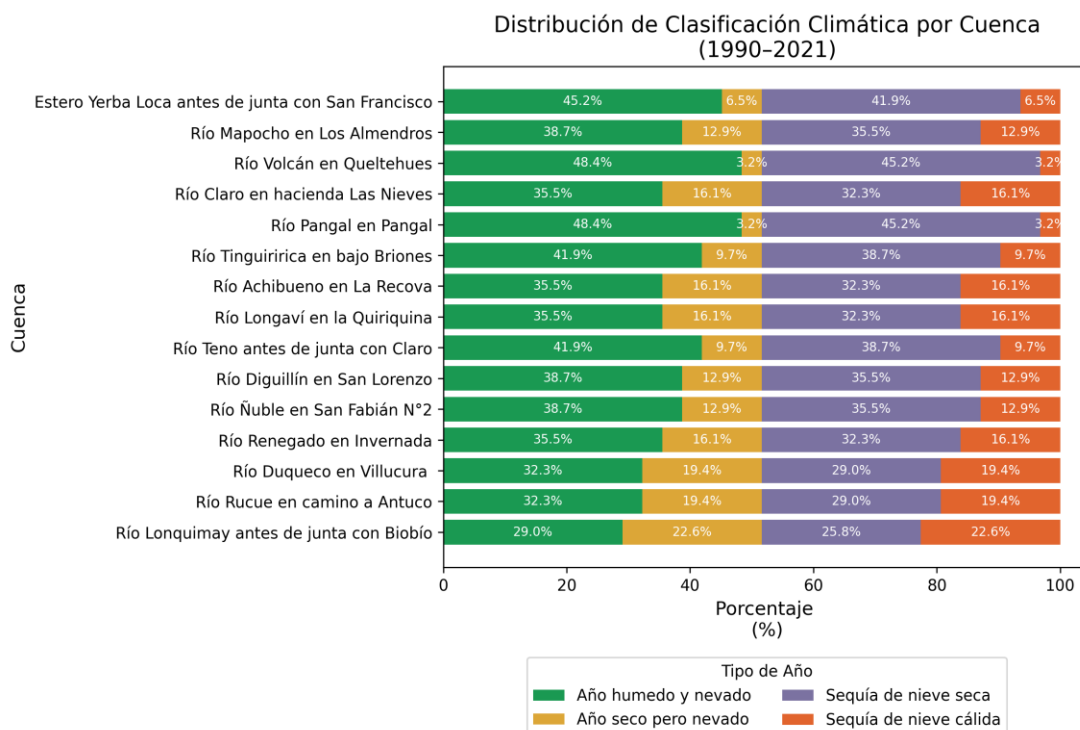


Figura 31. Distribución porcentual de clasificación climática por cuenca durante el periodo 1990-2021

