



Universidad de Concepción

Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía.

Departamento de Geografía.

Programa de Magister en Análisis Geográfico.

**INVENTARIO GEOESPACIAL DE SISTEMAS DE MONTAÑA ANDINA EN LA
REGIÓN DEL BIOBÍO COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN AMBIENTAL**

Tesis presentada a la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía de la
Universidad de Concepción para optar al grado académico de Magister en
Análisis Geográfico

Alumno: Felipe Thompson Pérez

Profesor Guía: Dr. David Farías Barahona

Concepción, Chile 2026

Este trabajo fue apoyado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través del proyecto ANID SIA Fortalecimiento académico en Geografía con énfasis en el estudio de la Criósfera y la aplicación de geotecnologías. SIA PAI85220007

Índice de contenidos

| | |
|--|----|
| Resumen | 5 |
| Abstract | 6 |
| 1. Introducción | 9 |
| 1.1. Objetivo General | 13 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 13 |
| 2. Marco de Referencia | 13 |
| 2.1. Montañas como sistemas socioecológicos en el Antropoceno | 13 |
| 2.2. Fundamentos para la delimitación de sistemas de montaña andinos 16 | |
| 2.3. Altitud y pendiente como organizadores del sistema de montaña .. | 17 |
| 2.4. Brechas de monitoreo en los sistemas de montaña | 20 |
| 2.5. Integración geoespacial para el análisis de sistemas de montaña .. | 23 |
| 2.6. Sistemas de montaña andinos en la Región del Biobío | 25 |
| 3. Metodología | 27 |
| 3.1. Área de estudio | 27 |
| 3.2. Datos y fuentes de información | 30 |
| 3.2.1. Modelos Digitales de Elevación | 31 |
| 3.2.2. Variables climáticas | 33 |
| 3.2.3. Información territorial complementaria | 36 |
| 3.3. Delimitación geoespacial de los sistemas de montaña | 41 |
| 3.3.1. Criterios morfométricos de delimitación de sistemas de montaña andinos 43 | |
| 3.3.2. Identificación y delimitación de sistemas de montaña | 48 |
| 3.4. Construcción de la base de datos geoespacial | 52 |
| 3.5. Desarrollo de productos SIG interactivos | 54 |
| 4. Resultados | 56 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1. Delimitación de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío | 56 |
| 4.2. Inventario geoespacial de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío | 58 |
| 4.3. Visor geoespacial de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío | 62 |
| 4.4. <i>Dashboard</i> territorial de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío | 64 |
| 5. Discusión..... | 68 |
| 6. Conclusiones | 70 |
| 7. Bibliografía | 73 |
| 7.1. Bibliografía de literatura | 73 |
| 7.2. Fuentes de datos institucionales | 78 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.- Sistema de montaña andino como unidad territorial funcional integrada a partir de dimensiones biofísicas y socioespaciales. | 15 |
| Figura 2.- Esquema de diferenciación territorial según gradiente altitudinal y pendiente..... | 16 |
| Figura 3.- Perfil altitudinal longitudinal de la Región del Biobío..... | 18 |
| Figura 4.- Perfil altitudinal de los sistemas de montaña andinos en la Región del Biobío. | 19 |
| Figura 5.- Principales brechas estructurales de monitoreo en montaña. | 22 |
| Figura 6.- Herramientas para la reducción de brechas de monitoreo en la montaña..... | 22 |
| Figura 7.- Distribución de las regiones de montaña en Chile y localización del área de estudio en la Región del Biobío..... | 26 |
| Figura 8.- Localización político-administrativa de la Región del Biobío. | 29 |
| Figura 9.- Gradiente altitudinal de la Región del Biobío a partir de DEM. | 30 |
| Figura 10.- Esquema de procesamiento del DEM para el análisis topográfico. | 33 |
| Figura 11. - Esquema de procesamiento de variables climáticas. | 36 |
| Figura 12.- Procesamiento de información territorial complementaria..... | 40 |
| Figura 13.- Mapa de clasificación altitudinal de la Región del Biobío. | 44 |
| Figura 14.- Mapa de pendientes de la Región del Biobío. | 46 |
| Figura 15.- Índice de rugosidad del terreno (TRI) de la Región del Biobío. | 47 |
| Figura 16.- Criterios geomorfológicos utilizados para la delimitación de los sistemas de montaña en la Región del Biobío..... | 48 |
| Figura 17.- Flujo metodológico para la delimitación espacial de sistemas de montaña..... | 49 |
| Figura 18.- Máscara preliminar de áreas de montaña. | 50 |
| Figura 19.- Máscara final áreas de montaña andina de la Región del Biobío. .. | 50 |
| Figura 20.- Unidades geomorfológicas de la Región del Biobío. | 51 |
| Figura 21.- Flujo metodológico de delimitación de sistemas de montaña. | 52 |
| Figura 22.- Delimitación final de sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío. | 58 |
| Figura 23.- Visor geoespacial de sistemas de montaña de la Región del Biobío. | 64 |
| Figura 24.- Estructura general del dashboard geoespacial. | 65 |
| Figura 25.-Visualización de indicadores y variables climáticas en el dashboard. | 67 |

Figura 26.- Visualización de variables físicas y socioespaciales en el dashboard.
..... 68

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.- Fuentes de datos geoespaciales utilizadas en la investigación. | 39 |
| Tabla 2.- Clasificación altitudinal utilizada en la delimitación de sistemas de montaña..... | 44 |
| Tabla 3.- Clasificación de pendientes utilizada en la delimitación de sistemas de montaña..... | 45 |
| Tabla 4.- Índice de rugosidad de terreno de sistemas de montaña. | 46 |
| Tabla 5.- Sistemas de montaña andinos desarrollados en el análisis territorial. | 57 |
| Tabla 6.- Estructura temática del inventario geoespacial | 60 |

Resumen

Las montañas constituyen sistemas socioecológicos complejos cuya comprensión demanda enfoques transdisciplinarios. Desde la perspectiva de la montología, entendida como una aproximación orientada a integrar ciencias naturales, sociales y saberes territoriales en el estudio de las montañas (Haller & Branca, 2020), los sistemas de montaña no pueden reducirse únicamente a entidades geomorfológicas, sino que deben analizarse como configuraciones donde interactúan procesos físicos, dinámicas climáticas, criosféricas y ecológicas junto con dimensiones territoriales y culturales. Esta perspectiva se alinea con el desarrollo contemporáneo de los estudios de montaña impulsados por la *Mountain Research Initiative (MRI)* y *GEO Mountains* (Pepin, et al., 2024).

En la Región del Biobío, los sistemas de montaña representan unidades territoriales estratégicas para la regulación hídrica y la resiliencia ecosistémica. La evidencia reciente indica que las regiones de montaña experimentan procesos de calentamiento dependiente de la altitud (*elevation-dependent warming*) y cambios climáticos amplificadas (Pepin, et al., 2024). No obstante, persisten brechas significativas de información en los sistemas de montaña, especialmente en la cobertura altitudinal y continuidad temporal de datos climáticos y criosféricos. Las redes de observación meteorológica presentan una marcada subrepresentación en cotas elevadas, lo que limita la comprensión del calentamiento dependiente de la altitud y la variabilidad hidroclimática (Pepin, et al., 2024).

Este estudio desarrolla un inventario geoespacial de sistemas de montaña con cobertura glaciaria en la Región del Biobío, sustentado en criterios morfométricos y climáticos, en coherencia con el marco de “Variables Climáticas Esenciales de Montaña” (Thornton, et al., 2021) y con iniciativas de observación estandarizada

en gradientes altitudinales como *UHOP*¹ (Pepin, et al., 2024). La delimitación integra modelos digitales de elevación, análisis de gradientes altitudinales y cobertura glaciaria oficial, junto con variables climáticas derivadas de sensores satelitales y reanálisis procesados en entornos SIG.

Como proyección aplicada, se implementa un visor web SIG interoperable con panel de indicadores en plataforma *ArGIS Online*, siguiendo el enfoque de plataformas geoespaciales abiertas desarrollado en QFuego-Patagonia (Farías-Barahona, et al., 2026). Desde un enfoque montológico, esta investigación propone una infraestructura de conocimiento territorial orientada a fortalecer la gobernanza ambiental y la planificación basada en evidencia en sistemas de montaña de la Región del Biobío.

Los productos geoespaciales generados se encuentran disponibles a través de los siguientes enlaces:

[Mapa web sistemas de montaña andinos Región del Biobío](#)

[Dashboard sistemas de montaña andinos Región del Biobío](#)

[Inventario geoespacial sistemas de montaña](#)

Palabras clave: sistemas de montaña, glaciares, inventario geoespacial, visor interactivo, Región del Biobío.

Abstract

Mountains constitute complex socio-ecological systems whose understanding demands transdisciplinary approaches. From the perspective of montology, understood as an approach oriented toward integrating natural sciences, social sciences, and territorial knowledge in the study of mountains (Haller & Branca, 2020), mountain systems cannot be reduced solely to geomorphological entities,

¹ Propuesto por *Unified High Elevation Observational Platform (UHOP)*. *Mountain Research Initiative & GEO Mountains*. doi: 10.48620/77051

but must be analyzed as configurations where physical processes, climatic, cryospheric, and ecological dynamics interact with territorial and cultural dimensions. This perspective aligns with the contemporary development of mountain studies promoted by the Mountain Research Initiative (MRI) and GEO Mountains (Pepin, et al., 2024).

In the Biobío Region, mountain systems represent strategic territorial units for water regulation and ecosystem resilience. Recent evidence indicates that mountain regions experience elevation-dependent warming and amplified climate change (Pepin et al., 2024). However, significant information gaps persist in mountain systems, particularly regarding the altitudinal coverage and temporal continuity of climate and cryospheric data. Meteorological observation networks are markedly underrepresented at high elevations, limiting our understanding of elevation-dependent warming and hydroclimatic variability (Pepin et al., 2024).

This study develops a geospatial inventory of mountain systems with glacial cover in the Biobío Region, based on morphometric and climatic criteria, consistent with the "Essential Mountain Climate Variables" framework (Thornton et al., 2021) and with standardized observation initiatives along altitudinal gradients such as UHOP (Pepin et al., 2024). The delimitation integrates digital elevation models, altitudinal gradient analyses, and official glacier cover data, along with climatic variables derived from satellite sensors and reanalyzes processed in GIS environments.

As an applied application, an interoperable GIS web viewer with an indicator panel is implemented on the ArGIS Online platform, following the open geospatial platform approach developed in QFuego-Patagonia (Fariás-Barahona et al., 2026). From a montane perspective, this research proposes a territorial knowledge infrastructure aimed at strengthening environmental governance and evidence-based planning in mountain systems of the Biobío Region.

The generated geospatial products are available through the following links:

[Web map of Andean mountain systems in the Biobío Region](#)

[Dashboard of Andean mountain systems in the Biobío Region](#)

[Geospatial inventory of mountain systems](#)

Keywords: *mountain systems, glaciers, geospatial inventory, interactive viewer, Biobío Region.*

1. Introducción

Los sistemas de montaña constituyen territorios estratégicos a escala global, tanto por su relevancia ecológica como por su rol funcional en la regulación climática e hidrológica. Diversos estudios han destacado que las montañas albergan una proporción alta de biodiversidad respecto de su superficie, funcionando como verdaderos *hotspots* biogeográficos (Rahbek, et al., 2019). Asimismo, proveen servicios ecosistémicos esenciales, particularmente la provisión y regulación del agua dulce, razón por la cual han sido denominadas “torres de agua” del mundo (Viviroli, et al., 2007).

En el contexto del cambio climático, las montañas han sido identificadas como territorios altamente sensibles. La literatura ha abordado el fenómeno de calentamiento dependiente de la altitud (*elevation-dependent warming, EDW*), señalando que en numerosos casos las tasas de aumento térmico pueden diferir sistemáticamente con la elevación (Pepin, et al., 2022). Sin embargo, investigaciones recientes advierten que no existe un patrón global uniforme de amplificación térmica en montaña, sino variaciones regionales complejas tanto en temperatura como en precipitación (Pepin, et al., 2022). Esto ha dado paso a una comprensión más integral del fenómeno bajo el concepto de *Elevation-Dependent Climate Change (EDCC)*, que incorpora múltiples variables climáticas y procesos asociados (Thornton, et al., 2022).

Pese a su importancia, persiste una dificultad conceptual y metodológica en torno a la delimitación y caracterización de las montañas. La pregunta aparentemente simple de “¿qué es una montaña?” revela profundas diferencias según los criterios utilizados (topográficos, geomorfológicos, ecológicos o funcionales) (Sayre, et al., 2018). Las variaciones en definiciones y resoluciones espaciales pueden modificar sustancialmente la extensión territorial clasificada como montaña, lo cual incide directamente en la planificación, conservación y evaluación de políticas públicas asociadas (Sayre, et al., 2018).

A escala internacional, iniciativas como GEO-GNOME han enfatizado la necesidad de fortalecer la integración entre datos de observación terrestre e información in situ para mejorar el monitoreo de los sistemas de montaña bajo cambio global (Shahgedanova, et al., 2021). En esta línea, el concepto de Variables Climáticas Esenciales de Montaña (*Essential Mountain Climate Variables, EMCVs*) propone estandarizar los parámetros prioritarios para el seguimiento ambiental en estos territorios (Thornton, et al., 2021), subrayando la necesidad de observación sistemática, interoperable y territorialmente explícita.

En América Latina y particularmente en los Andes, la montaña no solo constituye una unidad biofísica, sino también un espacio social y político. La geografía crítica ha señalado cómo los Andes han sido construidos históricamente como frontera natural y límite estatal, invisibilizando otras lecturas territoriales y socioambientales (Núñez, et al., 2017). Esta perspectiva invita a comprender la montaña como sistema socioecológico complejo, donde confluyen procesos físicos, dinámicas territoriales y decisiones institucionales.

En Chile, y particularmente en la Región del Biobío, los sistemas de montaña andinos cumplen funciones clave en la regulación hídrica, la provisión de servicios ecosistémicos y la configuración de dinámicas territoriales. No obstante, la información disponible sobre su delimitación sistemática, caracterización espacial y visualización integrada es fragmentaria, dispersa entre distintas bases de datos y con escasa articulación en plataformas accesibles para la toma de decisiones (Shahgedanova, et al., 2021).

Frente a este escenario, se hace necesario avanzar hacia una sistematización geoespacial coherente y operativa de los sistemas de montaña andinos, que permita integrar criterios morfométricos objetivos con herramientas digitales de visualización y análisis.

Planteamiento del problema

Los sistemas de montaña de la Región del Biobío constituyen unidades territoriales estratégicas desde el punto de vista ecológico, hidrológico y socioespacial. No obstante, a pesar de su relevancia para la provisión de agua, la regulación climática y la conservación de la biodiversidad, estos territorios han sido históricamente subrepresentados en los sistemas de monitoreo ambiental y en los instrumentos de planificación territorial. La información existente se encuentra fragmentada, dispersa entre diversas instituciones y carente de integración geoespacial sistemática, lo que limita su uso efectivo para la gestión y la toma de decisiones (Shahgedanova, et al., 2021).

Desde la perspectiva de la montología², las montañas no deben entenderse únicamente como unidades físicas, sino como sistemas socioecológicos complejos, donde interactúan procesos biofísicos, dinámicas territoriales y estructuras institucionales. La ausencia de una delimitación clara y de una base de datos integrada impide reconocer estos sistemas como unidades funcionales coherentes, invisibilizando su rol en la provisión de servicios ecosistémicos y en la sostenibilidad regional. Este vacío conceptual y técnico genera una brecha entre el conocimiento científico disponible y su aplicación en políticas públicas y planificación territorial.

En el contexto del cambio climático, esta problemática adquiere mayor urgencia. La evidencia de calentamiento dependiente de la altitud (*EDW*) indica que las zonas de montaña pueden experimentar tasas de aumento térmico diferenciadas respecto de las tierras bajas (Pepin, et al., 2015). A nivel nacional, estudios han mostrado que los glaciares de Chile han perdido más del 40% de su volumen en

² La montología se define como el campo interdisciplinario de estudio que aborda de manera integrada los sistemas de montaña, considerando sus dimensiones físicas, ecológicas, sociales, culturales y políticas, con el objetivo de comprender su complejidad territorial, sus dinámicas ambientales y su relevancia para el desarrollo sostenible. Este enfoque reconoce a las montañas no solo como unidades geomorfológicas, sino como territorios estratégicos donde interactúan procesos biofísicos —como la criósfera, la regulación hídrica y la biodiversidad— con dinámicas socioeconómicas y culturales específicas (Shahgedanova, et al., 2021).

los últimos 70 años, con un retroceso particularmente acelerado desde la década de 1980 (DGA, 2022). En este contexto, la pérdida de masa glaciar y la reducción de la cobertura nival afectan directamente los regímenes hidrológicos, disminuyendo la disponibilidad de agua en períodos secos y alterando la estacionalidad de los caudales.

Estos cambios no se restringen al ámbito físico de la montaña. La transformación de la criósfera y de los sistemas hidrológicos repercute “montaña abajo”, impactando a comunidades, actividades productivas, infraestructura crítica y ecosistemas dependientes del agua. Asimismo, el aumento de eventos hidrometeorológicos extremos y procesos geomorfológicos como aluviones y deslizamientos incrementa la exposición al riesgo en zonas pobladas (Ugalde & Ugalde, 2025). La situación se ve desmejorada por la escasez de datos observacionales en ambientes de alta montaña. A nivel global, menos del 3% de las estaciones meteorológicas se ubican por sobre los 2.000 m.s.n.m., y prácticamente no existen registros sistemáticos en altitudes superiores a los 5.000 m (Pepin, et al., 2015).

Esta carencia de monitoreo reduce la capacidad de evaluar con precisión los impactos del cambio climático y aumenta la incertidumbre en la planificación de recursos hídricos y en la gestión del riesgo.

En la Región del Biobío, esta brecha se expresa en la inexistencia de un inventario geoespacial integrado de los sistemas de montaña y en la ausencia de herramientas digitales públicas que permitan consultar de manera articulada información climática, hidrológica, ecológica y socioespacial. La información disponible se encuentra distribuida en múltiples plataformas, con escalas, formatos y criterios metodológicos heterogéneos, dificultando su interoperabilidad y análisis conjunto. En síntesis, el problema central radica en la falta de una sistematización geoespacial integrada que permita delimitar, caracterizar y visualizar los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío

como unidades territoriales funcionales. Frente a este vacío, se hace necesario desarrollar un inventario geoespacial estructurado y herramientas digitales interactivas que integren información ambiental y territorial, permitiendo comprender de manera sintética y operativa la dinámica de los sistemas de montaña y su influencia en la región.

1.1. Objetivo General

Desarrollar un inventario geoespacial de los sistemas de montaña andinos en la Región del Biobío, mediante la construcción de una base de datos integrada y la implementación de un visor digital interactivo, que permita su delimitación, caracterización y visualización como unidades territoriales funcionales.

1.2. Objetivos Específicos

- Delimitar y caracterizar espacialmente los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío mediante la aplicación de criterios morfométricos objetivos procesados en entornos SIG.
- Construir e integrar una base de datos geoespacial temática que articule información biofísica y socioespacial asociada a los sistemas de montaña identificados.
- Diseñar e implementar un visor digital interactivo con panel de indicadores temáticos, que permita la visualización, consulta y síntesis analítica de las principales variables ambientales, sociales y funcionales de los sistemas de montaña caracterizados.

2. Marco de Referencia

2.1. Montañas como sistemas socioecológicos en el Antropoceno

Las montañas han sido tradicionalmente definidas a partir de atributos morfológicos tales como altitud, relieve abrupto y pendientes pronunciadas. Sin embargo, la investigación contemporánea ha evolucionado hacia una

comprensión sistémica, reconociendo a las montañas como sistemas socioecológicos complejos, donde interactúan procesos biofísicos, dinámicas ecológicas y estructuras sociales en múltiples escalas espaciales y temporales (Adler, et al., 2020). Esta perspectiva se enmarca en lo que Sarmiento (2020) denomina “montología”, entendida como una agenda transdisciplinaria que integra ciencias naturales, sociales y humanidades para estudiar la montaña como un sistema dinámico interdependiente, particularmente relevante en el contexto del cambio (Sarmiento, 2020).

La montología no reemplaza a la geografía física ni a la geomorfología; las articula con dimensiones culturales, políticas y territoriales, reconociendo que los procesos que ocurren en montaña trascienden sus límites altitudinales y se proyectan “montaña abajo”. Desde esta óptica, los sistemas de montaña constituyen nodos estratégicos en la regulación ambiental global y regional. Viviroli et al. (2020) destacan su papel en la regulación hídrica y provisión de servicios ecosistémicos esenciales, mientras que investigaciones recientes enfatizan su sensibilidad frente a las dinámicas del cambio climático y la necesidad de fortalecer redes de observación para comprender dichas transformaciones (Shahgedanova, et al., 2021).

En coherencia con el enfoque montológico contemporáneo, los sistemas de montaña andinos pueden comprenderse como unidades territoriales funcionales donde convergen dimensiones biofísicas y socioespaciales articuladas mediante interacciones dinámicas que estructuran flujos ecológicos, hídricos y territoriales. Desde esta perspectiva, la montaña no constituye únicamente un relieve elevado, sino un sistema socioecológico integrado cuya organización responde a gradientes altitudinales, procesos morfométricos, dinámicas climáticas y configuraciones de uso y gobernanza del territorio (Sarmiento, 2020). La figura 1 sintetiza esta concepción, representando el sistema de montaña andino como un núcleo territorial estructurado por una dimensión biofísica que incluye

morfometría, relieve, clima, hidrología y ecosistemas y una dimensión socioespacial asociada a asentamientos, infraestructura, usos del suelo, actividades productivas y planificación territorial interconectadas mediante procesos de interacción que se expresan en la provisión de servicios ecosistémicos y en dinámicas de planificación y gestión.

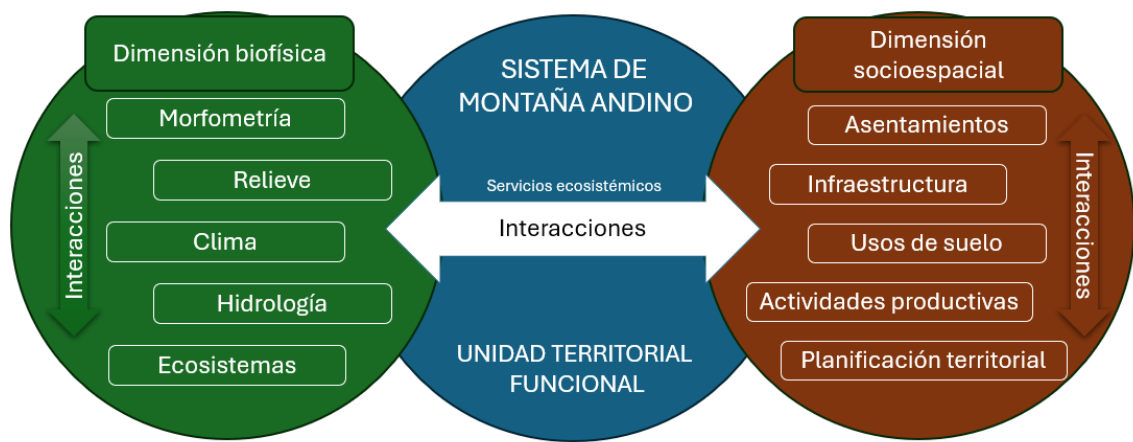


Figura 1.- Sistema de montaña andino como unidad territorial funcional integrada a partir de dimensiones biofísicas y socioespaciales. Elaboración propia.

Así entonces, en el contexto del Antropoceno, las montañas enfrentan presiones simultáneas: variabilidad climática intensificada, expansión de infraestructura, turismo, actividades extractivas y transformación de coberturas vegetales. Estas presiones no operan de manera aislada, sino que interactúan con la estructura topográfica y ecológica del territorio, generando efectos acumulativos. Esta condición convierte a los sistemas de montaña en territorios particularmente sensibles y, al mismo tiempo, estratégicos para la adaptación regional.

En el caso de la Región del Biobío, los sistemas de montaña andinos forman parte de una estructura territorial compleja donde confluyen la cordillera, el piedemonte y los valles intermedios. No constituyen únicamente una “zona alta”, sino una matriz funcional que regula flujos hídricos, estructura gradientes ecológicos y condiciona la organización espacial de actividades humanas.

Desde esta perspectiva, el desarrollo de un inventario geoespacial no responde únicamente a una necesidad cartográfica, sino a la construcción de una unidad analítica territorial que permita comprender a la montaña como un sistema integrado.

2.2. Fundamentos para la delimitación de sistemas de montaña andinos

La delimitación de sistemas de montaña no constituye un ejercicio únicamente cartográfico, sino un problema epistemológico central en la investigación montológica contemporánea. En esta línea, Snethlage, et al. (2022) advierten que la variabilidad en los criterios de delimitación explica discrepancias significativas en la superficie global clasificada como montañosa. Por su parte, Körner, et al. (2021), señalan que la montaña no posee límites geométricos intrínsecos, sino que emerge como una configuración espacial derivada de combinaciones de relieve, gradiente altitudinal y dinámica geomorfológica. A diferencia de una cuenca hidrográfica, definida por divisorias topográficas explícitas, la montaña requiere la selección de criterios estructurales que permitan identificar configuraciones del relieve que organizan procesos biofísicos y territoriales.



Figura 2.- Esquema de diferenciación territorial según gradiente altitudinal y pendiente.

Elaboración propia adaptado de Körner et al. (2021).

En este contexto, la altitud y la pendiente han sido históricamente reconocidas como las variables estructurales primarias para la delimitación de montañas. Kapos, et al. (2000) propusieron una clasificación global basada en umbrales altitudinales combinados con pendiente, mientras que estudios posteriores enfatizaron la necesidad de complementar la altitud con indicadores que capturen la energía del relieve (Körner, et al., 2011). La razón, por ejemplo, radica en que una meseta elevada puede superar los 1.500 m.s.n.m., pero si carece de inclinación significativa y heterogeneidad topográfica, no expresa necesariamente dinámica montañosa. Desde esta perspectiva, la delimitación no debe entenderse como la identificación de “zonas altas”, sino como el reconocimiento de configuraciones topográficas que estructuran gradientes ambientales diferenciados (Körner, et al., 2021).

En este contexto, la altitud organiza los gradientes térmicos y ecológicos, mientras que la pendiente expresa la energía topográfica y la dinámica geomorfológica asociada (Körner, et al., 2011). La combinación de ambas variables permite distinguir entre mesetas elevadas relativamente estables, cerros ondulados de baja energía y sistemas montañosos estructurados donde convergen gradiente vertical e inclinación significativa.

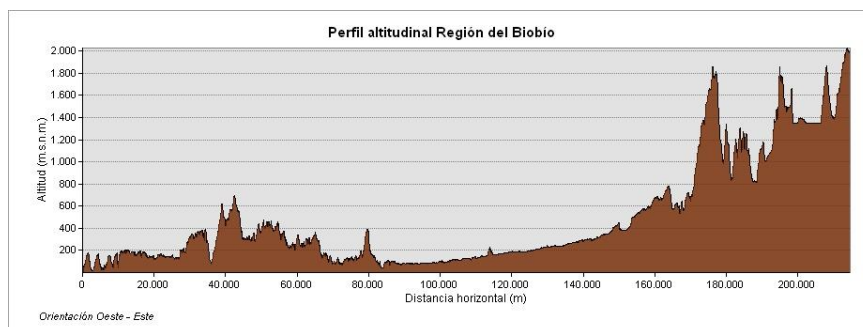
2.3. Altitud y pendiente como organizadores del sistema de montaña

La altitud constituye el eje estructurante primario de los sistemas de montaña, ya que organiza gradientes térmicos, la presión atmosférica, la radiación y la precipitación orográfica. Körner, et al. (2011) señalan que la elevación es el determinante fundamental de la zonación altitudinal de la vegetación, mientras que Fernández, et al. (2024) destacan su rol en la regulación hidrológica y la generación de cabeceras de cuenca. Sin embargo, la altitud no opera de forma aislada puesto que la pendiente expresa la energía del relieve y determina la redistribución gravitacional de materiales, la dinámica erosiva y la configuración de escorrentías superficiales (Ao, et al., 2024). En términos geomorfológicos, la

inclinación del terreno refleja la capacidad del sistema para generar procesos activos de montaña, tales como movimientos en masa, incisión fluvial o modelado glacial (Pepin, et al., 2015).

La interacción entre altitud y pendiente permite distinguir entre superficies elevadas pasivas y sistemas montañosos estructurados. En consecuencia, ambas variables deben entenderse como complementarias; La altitud como organizador del gradiente vertical del sistema y la pendiente como estructuradora de la dinámica del relieve (Körner, et al., 2011)

La expresión territorial de la interacción entre altitud y pendiente puede observarse de manera evidente en el perfil longitudinal de la Región del Biobío. El gradiente oeste–este revela una secuencia morfoestructural que transita desde planicies costeras y depresión intermedia de baja energía topográfica hacia configuraciones progresivamente más elevadas e inclinadas en la precordillera y cordillera andina. Este patrón confirma que la montaña no emerge de forma abrupta, sino como resultado de un incremento combinado en elevación y estructura del relieve, configurando un sistema topográfico jerárquico y funcional (Körner, et al., 2021). Las figuras 3 y 4 ilustran esta transición, diferenciando el perfil regional completo y el perfil específico de los sistemas de montaña andinos delimitados.



*Figura 3.- Perfil altitudinal longitudinal de la Región del Biobío.
Elaboración propia a partir de modelo digital de elevación.*

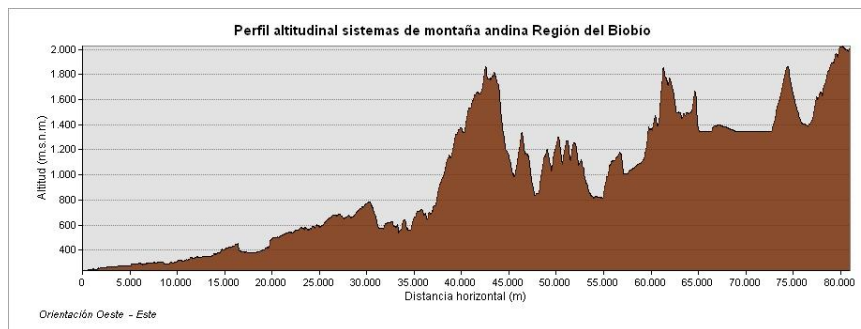


Figura 4.- Perfil altitudinal de los sistemas de montaña andinos en la Región del Biobío. Elaboración propia a partir de modelo digital de elevación.

Los perfiles altitudinales presentados permiten visualizar de manera sintética la organización vertical del territorio regional y la configuración específica de los sistemas de montaña andinos delimitados.

En el perfil regional completo, figura 3, se observa una progresión altitudinal gradual desde las planicies costeras hacia el sector cordillerano oriental, configurando una transición topográfica continua. Este patrón evidencia que el territorio del Biobío no se organiza en unidades abruptamente separadas, sino a través de un gradiente vertical que estructura cambios ambientales progresivos. La altitud actúa como eje ordenador de cinturones bioclimáticos, modulando temperatura, precipitación y distribución de coberturas vegetales, tal como ha sido documentado en estudios de montaña (Beniston, et al., 2018).

En contraste, el perfil correspondiente exclusivamente a los sistemas de montaña andinos delimitados, figura 4, muestra una concentración en rangos altitudinales medios y altos, con una mayor variabilidad vertical en distancias horizontales relativamente cortas. Esta configuración refleja lo que la literatura reciente denomina “amplificación vertical de gradientes ambientales”, fenómeno mediante el cual pequeños incrementos en altitud generan cambios desproporcionados en variables climáticas y ecológicas (Pepin, et al., 2015). En este sentido, la altitud no solo delimita espacialmente la montaña, sino que intensifica procesos diferenciales respecto de las tierras bajas adyacentes.

Desde esta perspectiva, los perfiles altitudinales no cumplen solo una función descriptiva, sino que permiten visualizar el soporte físico sobre el cual se articulan las funciones biofísicas y socioespaciales que caracterizan a los sistemas de montaña andinos. La altitud, en tanto gradiente continuo, constituye el eje estructurante que explica la transición entre planicies funcionalmente homogéneas y territorios de alta heterogeneidad ambiental, reforzando la pertinencia de su utilización como criterio primario en la delimitación conceptual de sistemas de montaña (Körner, et al., 2021).

2.4. Brechas de monitoreo en los sistemas de montaña

El desarrollo de inventarios geospaciales de sistemas de montaña exige una base observacional sólida que permita caracterizar sus dinámicas ambientales, climáticas y funcionales en gradientes altitudinales. Sin embargo, uno de los principales desafíos identificados en la literatura reciente es la persistente subrepresentación de las zonas de alta montaña en las redes de monitoreo climático global. Shahgedanova, et al. (2021) advierten que las montañas continúan siendo territorios con cobertura instrumental irregular y fragmentada, tanto en términos espaciales como temáticos. La brecha más evidente corresponde a la disminución sistemática de estaciones meteorológicas a medida que aumenta la altitud. Pepin, et al. (2022) muestran que la densidad de estaciones se reduce significativamente por sobre los 2.000 – 2500 m.s.n.m, precisamente donde los procesos criosféricos e hidrológicos adquieren mayor relevancia. Esta limitación no solo restringe la detección de tendencias térmicas altitudinales, sino que también afecta la modelación de disponibilidad hídrica y el análisis de retroalimentaciones atmósfera–superficie, particularmente en contextos de cambio climático (Hock, et al., 2019).

En el caso de la cordillera de los Andes centro-sur, esta problemática adquiere especial relevancia. Las cabeceras de cuenca, donde se generan los principales aportes hídricos regionales, presentan escasa instrumentación continua.

Fernández, et al. (2024) subrayan que las montañas actúan como torres de agua, pero la cuantificación de sus flujos depende críticamente de datos observacionales en altura. La ausencia de registros prolongados en zonas altas introduce incertidumbre en la estimación de balances de nieve, almacenamiento glaciar y escorrentía estacional. Ante esta limitación estructural, la investigación en montaña ha recurrido crecientemente a productos satelitales y bases de datos climatológicas interpoladas. Thornton, et al. (2021) sostienen que la integración entre observaciones in situ y sensores remotos constituye actualmente la estrategia más robusta para compensar vacíos instrumentales. Los modelos digitales de elevación de alta resolución permiten, además, caracterizar gradientes morfométricos que influyen en la distribución espacial de variables climáticas (Sayre, et al., 2018).

No obstante, la dependencia creciente de datos satelitales no elimina las incertidumbres asociadas a la complejidad topográfica. Pepin, et al. (2022) advierten que los productos globales tienden a suavizar extremos térmicos locales en terrenos abruptos, mientras que los reanálisis atmosféricos presentan limitaciones para capturar microclimas de ladera.



Figura 5.- Principales brechas estructurales de monitoreo en montaña. Elaboración propia a partir de Shahgedanova et al. (2021).

Estas brechas no son únicamente un problema técnico, ya que condicionan directamente la delimitación y caracterización funcional de los sistemas de montaña. En consecuencia, la construcción del inventario no puede basarse exclusivamente en estaciones meteorológicas puntuales, sino que debe integrar distintas herramientas que se representan en la figura 6.

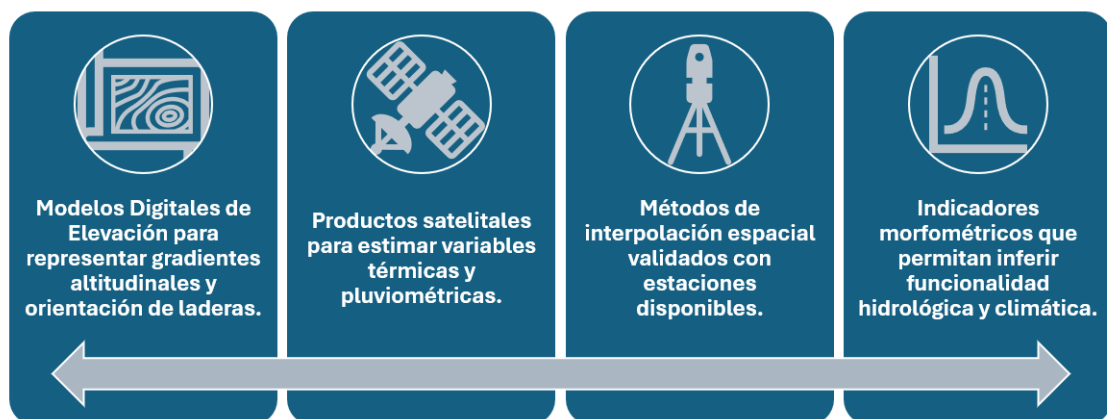


Figura 6.- Herramientas para la reducción de brechas de monitoreo en la montaña. Elaboración propia a partir de Thornton et al. (2021).

Esta aproximación híbrida responde a lo que Thornton, et al. (2021) denominan una estrategia de variables climáticas esenciales de montaña, donde la combinación de observaciones directas y estimaciones modeladas permite reducir incertidumbres sin depender exclusivamente de redes instrumentales densas.

2.5. Integración geoespacial para el análisis de sistemas de montaña

La representación analítica de los sistemas de montaña en el contexto contemporáneo requiere marcos metodológicos capaces de integrar heterogeneidad topográfica, variabilidad climática y dinámicas territoriales en escalas múltiples. En regiones de alta complejidad altitudinal, los sistemas de información geográfica han evolucionado desde herramientas cartográficas hacia plataformas analíticas que permiten modelar procesos espaciales con base en datos topográficos y observacionales de alta resolución (Goodchild, 2018).

En particular, los Modelos Digitales de Elevación (*DEM*)³ constituyen hoy el insumo estructural fundamental para el análisis de territorios montañosos, no solo por su capacidad de representar la altitud, sino por permitir la derivación sistemática de variables morfométricas como pendiente, orientación, curvatura y rugosidad, que actúan como *proxies* de procesos hidrológicos y microclimáticos (Guth, et al., 2021).

La incorporación de técnicas de fotogrametría satelital y modelación tridimensional fortalece la precisión altimétrica en ambientes de relieve complejo, permitiendo reconstrucciones más detalladas de superficies topográficas y cambios geomorfológicos en montaña (Guth, et al., 2021). Estas innovaciones son relevantes en contextos andinos, donde la topografía condiciona directamente la distribución de temperaturas, acumulación de nieve y conectividad hidrológica. Del mismo modo, los productos satelitales de

³ Digital Elevation Model, por sus siglas en inglés.

temperatura superficial, precipitación y cobertura nival logran alcanzar niveles de consistencia temporal que permiten construir climatologías altitudinales robustas incluso en ausencia de estaciones de alta montaña (Funk, et al., 2015). La integración de estos productos con modelamiento espacial mejora la representación de gradientes térmicos y pluviométricos en regiones con fuerte variabilidad vertical (Pepin, et al., 2022).

De esta manera, el análisis geoespacial en montaña no se limita a la superposición de capas, sino que implica la modelación explícita de interacciones entre topografía y variables ambientales (Guth, et al., 2021). Este enfoque permite reducir la incertidumbre asociada a interpolaciones lineales tradicionales y avanzar hacia representaciones más coherentes con la estructura altitudinal del territorio.

En este marco, la integración de *DEM*, teledetección y análisis espacial constituye una estrategia metodológica para abordar las brechas observacionales identificadas previamente. La combinación de datos satelitales con información topográfica permite generar superficies continuas de variables climáticas esenciales, mitigando la subrepresentación altitudinal de las redes de monitoreo convencionales (Thornton, et al., 2021).

Asimismo, la interoperabilidad de datos geoespaciales en plataformas SIG facilita la construcción de bases de datos temáticas integradas, donde variables biofísicas y socioespaciales pueden ser analizadas bajo una lógica territorial funcional (Li, et al., 2016). En consecuencia, la integración geoespacial no solo responde a una necesidad técnica derivada de la escasez de datos en zonas altas, sino que constituye una condición epistemológica para comprender la montaña como sistema complejo en el Antropoceno.

2.6. Sistemas de montaña andinos en la Región del Biobío.

La Región del Biobío se inserta dentro del sistema andino sur, un corredor montañoso de gran extensión y elevada actividad geomorfológica a escala continental. Los Andes chilenos constituyen una macroestructura orogénica caracterizada por una marcada diferenciación altitudinal, fuertes gradientes climáticos y una función hidrológica estructurante para las cuencas del centro-sur del país (Garreaud, 2009). En este contexto, la montaña no puede entenderse únicamente como una elevación topográfica, sino como un sistema territorial que organiza flujos atmosféricos, ciclos hidrológicos y patrones ecológicos en escalas regionales.

En el tramo correspondiente a la Región del Biobío, la cordillera andina alcanza altitudes cercanas a los 2800 – 3000 m.s.n.m, configurando un gradiente vertical que modula la distribución de precipitaciones, temperaturas y coberturas vegetales (Sarricolea, et al., 2017). Este gradiente altitudinal se traduce en una transición desde climas templados húmedos en piedemonte hacia condiciones nivales y periglaciales en sectores altos, estructurando dinámicas hidrológicas de carácter nival–pluvial que alimentan las principales cuencas regionales (Masiokas, et al., 2006).

Desde una perspectiva geomorfológica, el relieve andino del Biobío presenta pendientes pronunciadas, alta energía topográfica y una red de drenaje profundamente incisa, lo que refuerza su carácter de sistema montañoso funcional (Körner, 2007).

Dichas condiciones favorecen procesos de acumulación nival, escorrentía concentrada y susceptibilidad a eventos de remoción en masa, fenómenos que adquieren mayor relevancia en escenarios de variabilidad climática intensificada. Así entonces, la montaña actúa como un reservorio temporal de agua sólida, liberando escorrentía durante periodos secos y amortiguando parcialmente la variabilidad interanual.

En contraste, la Cordillera de la Costa, aunque morfológicamente elevada y ecológicamente relevante, presenta una amplitud altitudinal considerablemente menor y no desempeña un rol equivalente como cabecera de cuencas de régimen nival (Garreaud, 2009). Su configuración geomorfológica responde a procesos tectónicos y erosivos distintos, con pendientes menos abruptas y menor influencia en la generación de gradientes criosféricos.

Desde el punto de vista observacional, los Andes del Biobío comparten las brechas de monitoreo identificadas en otras regiones montañosas del hemisferio sur, con baja densidad de estaciones en sectores altos y dependencia creciente de productos satelitales para estimar variables climáticas (Shahgedanova, et al., 2021).

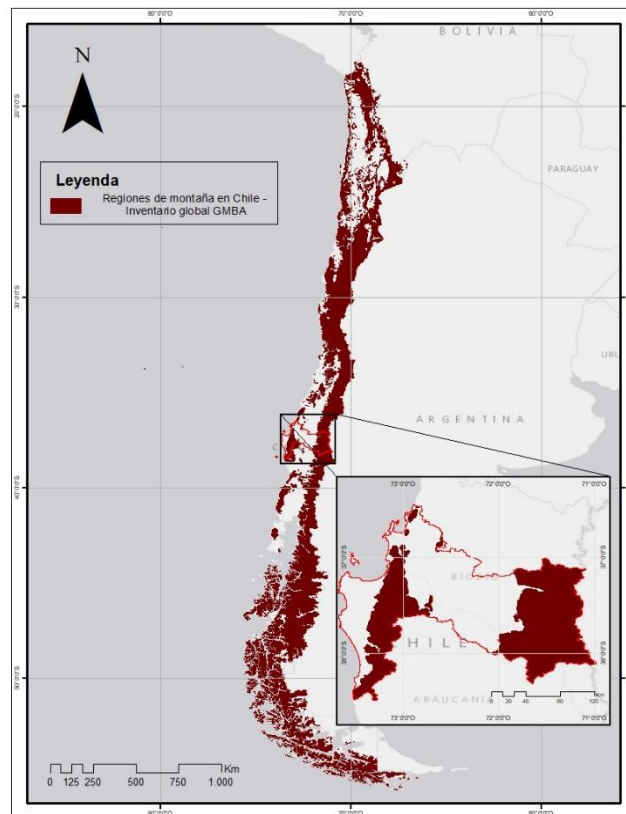


Figura 7.- Distribución de las regiones de montaña en Chile y localización del área de estudio en la Región del Biobío.

Elaboración propia a partir de datos del portal GMBA.

La figura 7 muestra la distribución de las áreas montañosas identificadas a escala nacional a partir del inventario global desarrollado por el *Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA)*, el cual delimita regiones montañosas mediante criterios topográficos derivados de modelos digitales de elevación (Snethlage, et al., 2022). En este contexto, el recuadro destaca la ubicación de la Región del Biobío dentro del corredor orográfico andino del centro-sur de Chile, permitiendo situar el área de estudio dentro de la estructura montañosa continua que caracteriza al sistema andino. Esta representación cartográfica proporciona el marco espacial de referencia para el análisis geoespacial desarrollado en esta investigación.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

La investigación se desarrolla en la Región del Biobío, ubicada en la zona centro-sur de Chile entre los 36° y 38° de latitud sur aproximadamente, territorio que forma parte del segmento centro-meridional de la Cordillera de los Andes. Desde una perspectiva fisiográfica, la región se estructura en torno a tres grandes unidades morfoestructurales: la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes, siendo esta última la unidad de mayor altitud y complejidad topográfica del territorio regional (Sarricolea, et al., 2017).

Los Andes del Biobío corresponden a un sector de transición entre los Andes mediterráneos del centro de Chile y los Andes templados húmedos del sur del país, lo que se traduce en una elevada heterogeneidad climática y ambiental a lo largo del gradiente altitudinal (Garreaud, 2009). En este tramo de la cordillera, las altitudes alcanzan valores cercanos a 2800–3000 m.s.n.m, configurando fuertes contrastes topográficos que condicionan la distribución espacial de temperaturas, precipitaciones y coberturas de nieve.

El relieve andino regional se caracteriza por pendientes pronunciadas, alta rugosidad del terreno y una red hidrográfica profundamente incisa, rasgos asociados a procesos tectónicos y volcánicos que han modelado el paisaje cordillerano durante el Cenozoico (Farias, et al., 2005). En este contexto, el arco volcánico de los Andes del sur de Chile constituye uno de los elementos geomorfológicos más relevantes del área de estudio. Dentro de la Región del Biobío destacan estructuras volcánicas como el volcán Antuco (2979 m.s.n.m.), el volcán Sierra Velluda (3585 m.s.n.m.), el cual contiene el glaciar de mayor envergadura de la Región del Biobío, el volcán Callaqui (3164 m.s.n.m.), el volcán Copahue (2997 m.s.n.m.), cuya cara poniente se encuentra en territorio nacional y el volcán Tolhuaca (2806 m.s.n.m.), cuya ladera norte se extiende hacia territorio de la región del Biobío. Estos edificios volcánicos contribuyen a la configuración de gradientes altitudinales pronunciados y a la diversidad geomorfológica de los sistemas de montaña regionales.

Desde el punto de vista hidrológico, los Andes del Biobío constituyen la zona de cabecera de importantes cuencas fluviales regionales, cuyos regímenes dependen en gran medida de los procesos de acumulación nival y escorrentía generados en sectores cordilleranos (Masiokas, et al., 2006). La interacción entre topografía y circulación atmosférica genera un incremento de la precipitación hacia sectores montañosos, reforzando el rol de la cordillera como reguladora de los recursos hídricos regionales (Garreaud, 2009).

La presencia de gradientes altitudinales pronunciados determina variaciones significativas en temperatura, precipitación y cobertura de nieve a lo largo del relieve cordillerano, configurando una elevada diversidad de condiciones ambientales en distancias relativamente cortas (Sarricolea, et al., 2017). Estos gradientes constituyen un elemento central para el análisis de los sistemas de montaña, ya que influyen en la organización espacial de los ecosistemas, la dinámica hidrológica y la distribución de variables climáticas.

El área de estudio se focaliza en los sistemas de montaña andinos presentes en la Región del Biobío, los cuales serán delimitados y caracterizados a partir de criterios morfométricos derivados de modelos digitales de elevación y análisis espacial en entornos SIG.

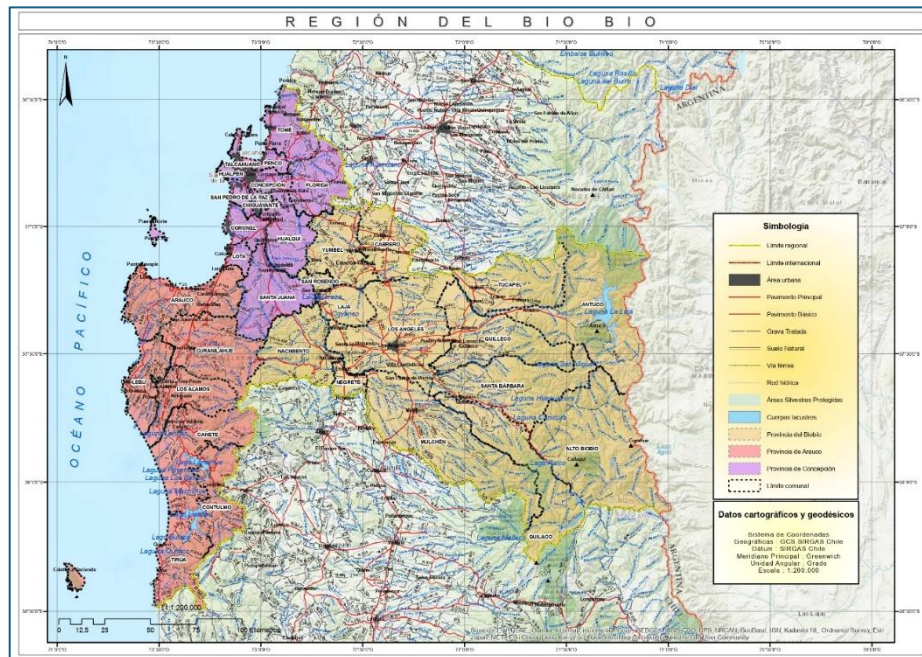


Figura 8.- Localización político-administrativa de la Región del Biobío. Elaboración propia a partir de capas vectoriales de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile).

Con el fin de contextualizar espacialmente el territorio analizado, la figura 8 presenta la localización político-administrativa de la Región del Biobío, mientras que la figura 9 muestra la distribución altitudinal del relieve regional a partir de un modelo digital de elevación. Ambas representaciones permiten visualizar la transición morfológica desde la zona costera hacia la cordillera de los Andes, donde se concentran los sistemas de montaña considerados en esta investigación.

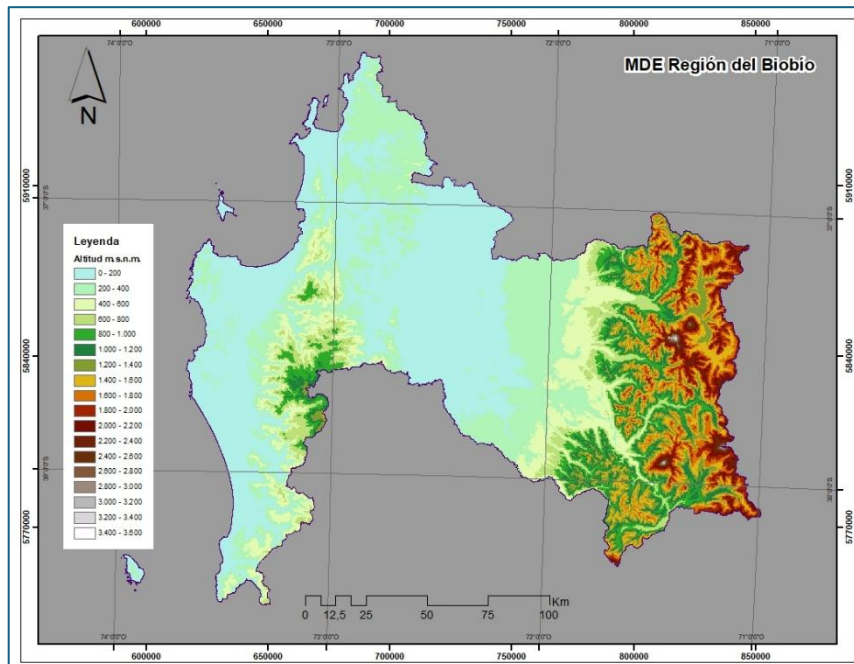


Figura 9.- Gradiente altitudinal de la Región del Biobío a partir de DEM. Elaboración propia a partir de Copernicus DEM.

El modelo digital de elevación permite visualizar la distribución altitudinal del relieve regional, evidenciando la transición geográfica desde las planicies costeras y la depresión intermedia hacia los sectores cordilleranos de mayor altitud. Los gradientes topográficos observados constituyen la base para la delimitación de los sistemas de montaña andinos mediante criterios morfométricos aplicados en el análisis espacial desarrollado en esta investigación.

3.2. Datos y fuentes de información

La construcción del inventario geoespacial de los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío requirió la integración de múltiples fuentes de información geoespacial provenientes de modelos digitales de elevación, productos climáticos derivados de sensores satelitales y bases de datos territoriales complementarias. La combinación de estas fuentes permite representar distintas

dimensiones del territorio montañoso, incluyendo su estructura morfométrica, su comportamiento climático y su contexto territorial.

El uso de datos geospaciales derivados de sensores remotos y modelos globales se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis de sistemas de montaña, particularmente en regiones donde la disponibilidad de información observacional es limitada. En muchos sectores cordilleranos, la baja densidad de estaciones meteorológicas dificulta la caracterización detallada de variables climáticas en gradientes altitudinales pronunciados, lo que ha impulsado el uso de productos satelitales y bases de datos climáticas globales para estimar dichas variables en territorios de difícil acceso (Pepin, et al., 2022).

3.2.1. Modelos Digitales de Elevación

El análisis geomorfológico y altitudinal de los sistemas de montaña requiere el uso de modelos digitales de elevación de alta calidad, ya que estos constituyen la base para la derivación de variables topográficas como pendiente, posición topográfica y gradientes altitudinales, fundamentales para comprender la organización espacial del relieve (Florinsky, 2012). Los modelos digitales de elevación permiten representar la superficie terrestre mediante una estructura ráster, donde cada celda contiene un valor de altitud, lo que posibilita el cálculo de múltiples indicadores derivados del relieve y el análisis de la complejidad geomorfológica del territorio (Grohmann, 2015).

Para la caracterización topográfica de la Región del Biobío se utilizó el *Copernicus Digital Elevation Model (Copernicus DEM)*, correspondiente al producto global *Copernicus DEM GLO-30*, con una resolución espacial de 30 metros. Este modelo permite representar de manera detallada la estructura altitudinal del relieve y constituye una base adecuada para el análisis de los sistemas de montaña presentes en el área de estudio. El modelo fue empleado para generar cartografía hipsométrica regional y como base para el análisis

morfométrico del territorio⁴, permitiendo un análisis de relieve en regiones montañosas dada su consistencia global y precisión altimétrica (Guth, et al., 2021).

La selección del modelo *Copernicus DEM GLO-30* se fundamenta en su alta precisión altimétrica, su adecuada representación del relieve montañoso y su disponibilidad como producto global de libre acceso. Este modelo presenta mejoras significativas respecto a *DEM* globales tradicionales como *SRTM*, *ASTER GDEM* o *NASADEM*, alcanzando errores verticales cercanos a 6–7 metros en evaluaciones comparativas, lo que resulta especialmente relevante en territorios montañosos donde pequeñas variaciones altitudinales influyen en la delimitación geomorfológica y en la derivación de variables topográficas (European Space Agency, 2022).

El procesamiento del modelo digital de elevación se desarrolló mediante procedimientos de análisis geoespacial orientados a la delimitación y caracterización de los sistemas de montaña. En primer lugar, el *Copernicus DEM GLO-30* fue descargado en formato *GeoTIFF* y reproyectado al sistema WGS84 / UTM zona 18 sur, con el fin de asegurar la consistencia espacial con las capas vectoriales utilizadas en la investigación.

Posteriormente, el *DEM* fue recortado al límite administrativo de la Región del Biobío, permitiendo restringir el análisis al área de estudio y optimizar el procesamiento de datos. A partir de esta área de trabajo se generó una clasificación hipsométrica del territorio, dividiendo el rango altitudinal en intervalos regulares con el objetivo de representar la estructura altitudinal del paisaje y analizar la distribución espacial de las unidades montañosas.

⁴ El *Copernicus Digital Elevation Model (COP-DEM)* corresponde a un modelo digital de elevación global desarrollado en el marco del programa Copernicus de la Unión Europea distribuido por la Agencia Espacial Europea (ESA). El producto GLO-30 posee una resolución espacial aproximada de 30m y se deriva principalmente de datos interferométricos SAR obtenidos por la misión *TanDEM-X / TerraSAR-X*.

De forma complementaria, se derivaron variables morfométricas tales como pendiente, orientación, rugosidad y gradientes altitudinales, indicadores utilizados en la caracterización geomorfológica y en el análisis de la complejidad topográfica de los sistemas montañosos (Serra, et al., 2025).

Estas variables constituyen la base para la delimitación y caracterización geomorfológica de los sistemas de montaña. El flujo metodológico del procesamiento del *DEM* utilizado se presenta en la figura 10.

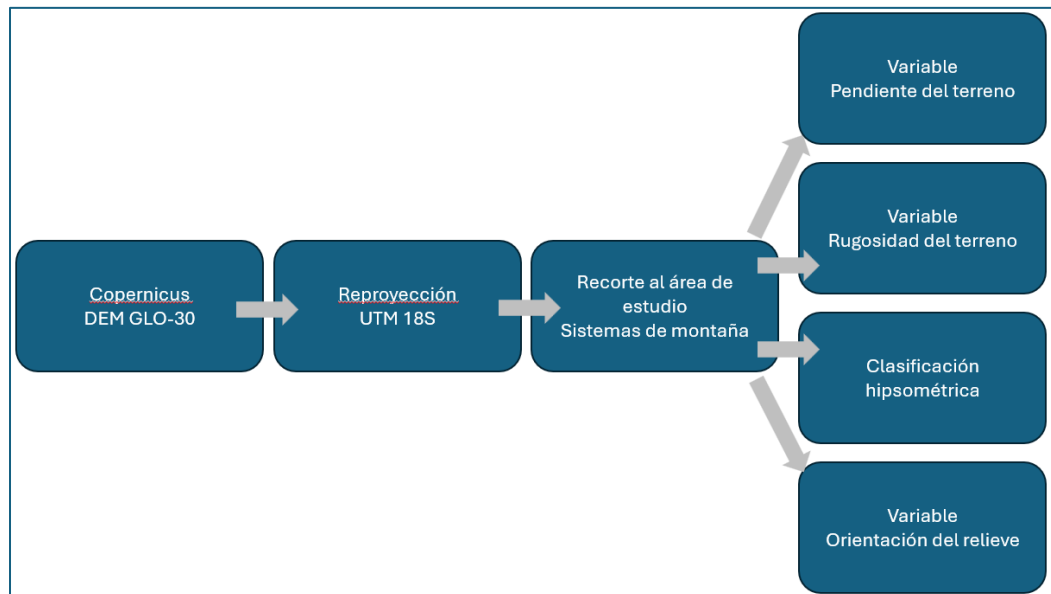


Figura 10.- Esquema de procesamiento del DEM para el análisis topográfico.

Elaboración propia.

3.2.2. Variables climáticas

La caracterización climática de los sistemas de montaña constituye un componente fundamental para comprender su funcionamiento ambiental, dado que variables como la temperatura y la precipitación condicionan procesos hidrológicos, ecológicos y geomorfológicos en estos territorios. Sin embargo, la disponibilidad de información meteorológica en regiones montañosas suele ser limitada debido a la baja densidad de estaciones de monitoreo en sectores de

difícil acceso, la alta variabilidad espacial asociada a la topografía y las dificultades técnicas propias de estos ambientes (Pepin, et al., 2022).

En esta investigación se utilizaron productos climáticos satelitales y grillados que permiten representar espacialmente variables de temperatura y precipitación. Estos datos permiten caracterizar gradientes altitudinales, identificar patrones espaciales y analizar la variabilidad climática regional, particularmente en territorios donde la información instrumental es escasa o discontinua.

Para la estimación de la temperatura superficial terrestre se empleó el producto *MODIS Land Surface Temperature (MOD11A2)*, derivado del sensor *MODIS* a bordo de los satélites *Terra* y *Aqua*. Este producto proporciona estimaciones de temperatura superficial con cobertura global, con resolución espacial de 1 km, resolución temporal mensual (composiciones de 8 días agregadas) y resolución espectral correspondiente a las bandas térmicas infrarrojas 31 y 32 (10.78–11.28 μm y 11.77–12.27 μm), utilizadas para el cálculo de temperatura superficial mediante algoritmos *split-window* (Wan, 2014).

En esta investigación se utilizaron datos mensuales correspondientes al periodo comprendido entre febrero del año 2000 y diciembre de 2025. Los datos fueron descargados en formato ráster multibanda (*GeoTIFF*) y posteriormente procesados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica. A partir de estos productos se generaron composiciones temporales y promedios mensuales, diferenciando entre temperatura superficial diurna y nocturna. Posteriormente, se aplicaron estadísticas zonales sobre los polígonos de los sistemas de montaña definidos en la investigación, permitiendo obtener valores promedio de temperatura superficial para cada unidad territorial.

Complementariamente, para la caracterización de la temperatura del aire y la precipitación se utilizó la base de datos CR2MET, desarrollada por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Este producto corresponde a un conjunto de datos climáticos grillados para Chile continental, generado mediante

la integración de observaciones de estaciones meteorológicas, variables topográficas y técnicas de interpolación espacial, lo que permite representar con mayor precisión la variabilidad climática en zonas de topografía compleja, como los sistemas de montaña (Alvarez-Garreton, et al., 2018).

Los datos CR2MET presentan una resolución espacial aproximada de 0.05° (~5 km), resolución temporal mensual, y se distribuyen en formato *NetCDF* multibanda, donde cada banda representa un periodo temporal específico. En esta investigación se utilizaron las variables de temperatura del aire ($^\circ\text{C}$) y precipitación (mm) correspondientes al periodo 2000–2019⁵.

Para su procesamiento, los archivos *NetCDF* fueron convertidos a formato ráster (*GeoTIFF*), permitiendo su integración en Sistemas de Información Geográfica. Posteriormente, se generaron composiciones mensuales y anuales, y se aplicaron estadísticas zonales sobre los polígonos de los sistemas de montaña, obteniendo valores promedio para cada unidad territorial. Este procedimiento permitió analizar la variabilidad climática espacial y la distribución altitudinal de la temperatura y la precipitación.

El uso conjunto de temperatura superficial derivada de *MODIS* y temperatura del aire proveniente de CR2MET permitió complementar la caracterización climática, considerando tanto la respuesta térmica de la superficie terrestre como las condiciones atmosféricas regionales. Asimismo, la incorporación de datos de precipitación provenientes de CR2MET permitió evaluar la distribución espacial de las precipitaciones en ambientes montañosos, donde la influencia de la topografía genera gradientes climáticos significativos.

⁵ El periodo de análisis se restringe hasta el año 2019 debido a que, al momento del desarrollo de esta investigación, los datos climáticos grillados del producto CR2MET disponibles públicamente en el portal del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) se encuentran publicados y validados hasta dicho año, constituyendo la serie temporal más reciente y consistente para su uso en análisis climáticos regionales.

Este enfoque permitió construir una caracterización climática espacialmente continua, consistente y comparable entre los distintos sistemas de montaña, contribuyendo a comprender la dinámica ambiental de estos territorios y su relación con los gradientes altitudinales presentes en la Región del Biobío.

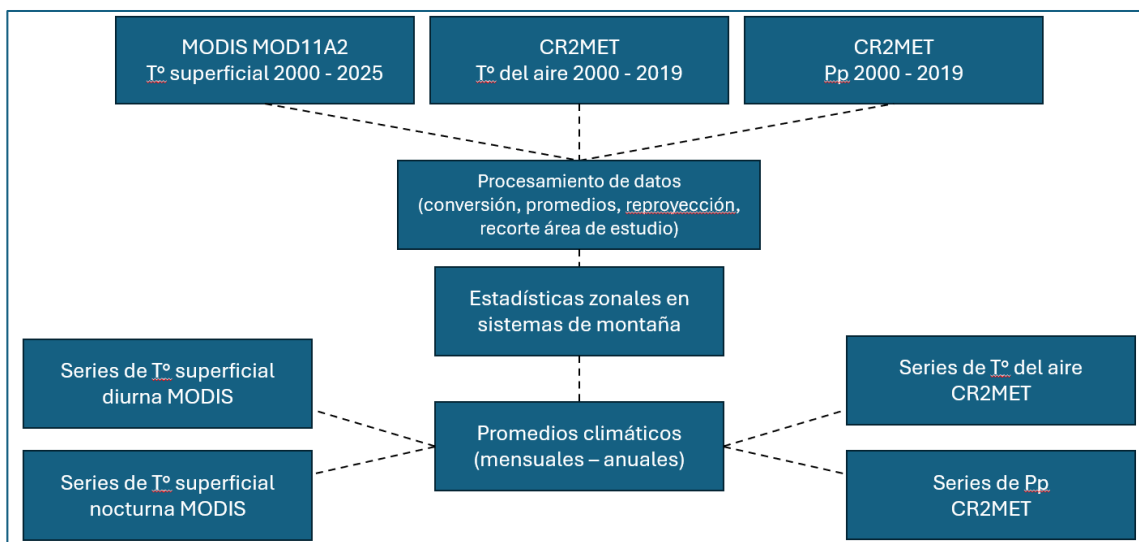


Figura 11. - Esquema de procesamiento de variables climáticas.
Elaboración propia.

3.2.3. Información territorial complementaria

Además de las variables topográficas y climáticas, el inventario geoespacial de sistemas de montaña incorpora capas territoriales complementarias que permiten contextualizar las unidades montañosas dentro de su entorno ambiental, administrativo y socioespacial. Estas capas contribuyen a la caracterización integral de los sistemas de montaña, incorporando dimensiones relacionadas con la gestión territorial, la conservación ambiental y la ocupación humana.

Las capas utilizadas corresponden a información geoespacial proveniente de bases de datos públicas e institucionales, obtenidas desde plataformas oficiales como la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile), el Ministerio del Medio Ambiente, el Gobierno Regional del Biobío, la Corporación Nacional

Forestal (CONAF) y otras instituciones públicas con información territorial relevante.

La incorporación de estas variables territoriales permitió construir una base de datos geoespacial integrada, en la cual cada sistema de montaña identificado fue caracterizado mediante múltiples atributos ambientales, territoriales y socioespaciales. Esta base de datos constituye el insumo principal para la construcción del inventario geoespacial regional de sistemas de montaña. Asimismo, la integración de estas capas territoriales permitió estructurar la información necesaria para el desarrollo del visor geoespacial interactivo para visualizar, consultar y analizar los sistemas de montaña de la Región del Biobío a partir de una perspectiva territorial integrada.

| Categoría | Capa | Institución | Plataforma / Fuente | Tipo de dato | Uso en la investigación |
|------------------|---|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Topográficas | DEM Copernicus GLO 30 m | Copernicus | Google Earth Engine | Ráster | Delimitación altitudinal |
| Topográficas | Pendiente | Copernicus | Google Earth Engine | Ráster | Análisis geomorfológico |
| Topográficas | Orientación | Copernicus | Google Earth Engine | Ráster | Caracterización geomorfológica |
| Topográficas | Sombreado | Copernicus | Google Earth Engine | Ráster | Visualización relieve |
| Climáticas | Temperatura superficial MODIS 2000–2025 | NASA | Google Earth Engine | Ráster | Series climáticas |
| Climáticas | Temperatura del aire CR2MET 2000–2019 | CR2 | CR2MET | Ráster | Análisis climático |
| Climáticas | Precipitación CR2MET 2000–2019 | CR2 | CR2MET | Ráster | Análisis climático |
| Hidrológicas | Cuencas | MMA | IDE Chile | Polígono | Contexto hidrológico |
| Hidrológicas | Subcuencas | MMA | IDE Chile | Polígono | Análisis hidrológico |

| Categoría | Capa | Institución | Plataforma / Fuente | Tipo de dato | Uso en la investigación |
|-------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Hidrológicas | Subsubcuencas | MMA | IDE Chile | Polígono | Detalle hidrológico |
| Hidrológicas | Red hidrográfica | IDE Chile | IDE Chile | Línea | Red fluvial |
| Hidrológicas | Lagos | IDE Chile | IDE Chile | Polígono | Cuerpos de agua |
| Hidrológicas | Humedales | MMA | SIMBIO | Polígono | Ecosistemas hídricos |
| Ecológicas | SNASPE | MMA | SIMBIO | Polígono | Áreas protegidas |
| Ecológicas | Formaciones vegetacionales Gajardo | MMA | SIMBIO | Polígono | Cobertura vegetal |
| Ecológicas | Formaciones vegetacionales Pliscoff | MMA | SIMBIO | Polígono | Cobertura vegetal |
| Ecológicas | Ecosistemas amenazados | GORE Biobío | SRIIT | Polígono | Conservación |
| Ecológicas | Reserva de la biosfera | GORE Biobío | SRIIT | Polígono | Conservación |
| Socioespaciales | Comunas | IDE Chile | IDE Chile | Polígono | Contexto territorial |
| Socioespaciales | Entidades pobladas | GORE Biobío | SRIIT | Polígono | Ocupación humana |
| Socioespaciales | Edificación rural | INE | GEODATOS | Polígono | Uso humano |
| Socioespaciales | Catastro ocupación de tierras | MMA | SIMBIO | Polígono | Presión territorial |
| Socioespaciales | Censo población 2024 | INE | GEODATOS | Polígono | Presión antrópica |
| Riesgos naturales | Fallas geológicas | GORE Biobío | SRIIT | Línea | Riesgo geológico |
| Riesgos naturales | Volcanes | GORE Biobío | SRIIT | Punto | Riesgo volcánico |
| Riesgos naturales | Riesgo volcanes Biobío | Datos para la Resiliencia | ITrend | Polígono | Vulnerabilidad |
| Geomorfológicas | Geología | GORE Biobío | SRIIT | Polígono | Caracterización física |

| Categoría | Capa | Institución | Plataforma / Fuente | Tipo de dato | Uso en la investigación |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Geomorfológicas | Unidades geomorfológicas | GORE Biobío | SRIIT | Polígono | Caracterización relieve |
| Geomorfológicas | Erosión actual | GORE Biobío | SRIIT | Polígono | Vulnerabilidad |
| Geomorfológicas | Red vial | GORE Biobío | SRIIT | Línea | Presión antrópica |
| Climáticas complementarias | Estaciones meteorológicas | IDE Chile | IDE Chile | Punto | Validación climática |
| Climáticas complementarias | Estaciones pluviométricas | IDE Chile | IDE Chile | Punto | Validación climática |
| Climáticas complementarias | Distritos agroclimáticos | IDE Chile | IDE Chile | Polígono | Contexto climático |
| Climáticas complementarias | Clasificación climática Köppen | IDE Chile | IDE Chile | Polígono | Caracterización climática |
| Criósfera | Glaciares | IDE Chile | IDE Chile | Polígono | Sistemas de montaña |
| Criósfera | Cobertura nival 2024 | DGA | MPOTECA | Polígono | Dinámica nival |

*Tabla 1.- Fuentes de datos geoespaciales utilizadas en la investigación.
Elaboración propia.*

Las capas territoriales presentadas en la tabla 1 corresponden a información geoespacial de distinta naturaleza, incluyendo datos vectoriales de tipo polígono, línea y punto, provenientes de diversas instituciones, lo que requirió un proceso previo de estandarización y preparación de la información.

En primer lugar, se realizó la recopilación y descarga de las capas desde las plataformas oficiales, priorizando información con cobertura regional y escalas adecuadas para el análisis territorial de los sistemas de montaña. Posteriormente, los datos fueron revisados y depurados, verificando la consistencia de las geometrías, la presencia de atributos relevantes y la coherencia espacial de cada capa. Luego, todas las capas fueron homologadas a un sistema de referencia común, proyectándose al sistema de coordenadas

UTM huso 18 sur (WGS84), con el fin de asegurar la correcta superposición espacial entre las distintas variables. Este proceso permitió integrar la información territorial en una base de datos geoespacial única, facilitando su análisis conjunto.

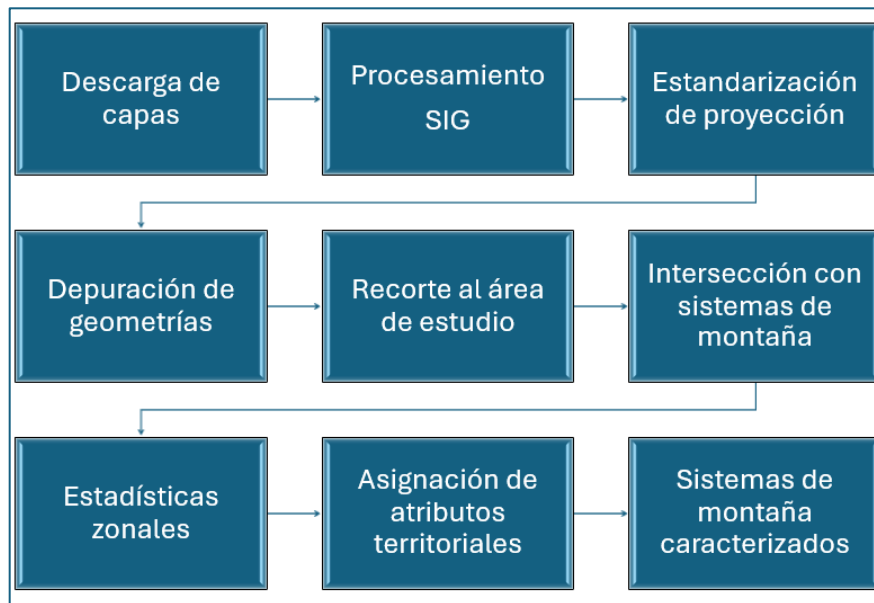


Figura 12.- Procesamiento de información territorial complementaria. Elaboración propia.

Una vez estandarizadas, las capas territoriales fueron intersectadas con los polígonos de sistemas de montaña delimitados, permitiendo asignar atributos territoriales específicos a cada unidad de análisis. Este procedimiento permitió caracterizar los sistemas de montaña en función de variables ambientales, hidrológicas, ecológicas y socioespaciales, tales como presencia de áreas protegidas, cobertura vegetal, redes hidrográficas, asentamientos humanos y condiciones de riesgo natural.

Posteriormente, se realizaron análisis espaciales mediante herramientas de estadísticas zonales y operaciones de superposición espacial, permitiendo cuantificar la información territorial dentro de cada sistema de montaña.

3.3. Delimitación geoespacial de los sistemas de montaña

La delimitación geoespacial de los sistemas de montaña constituye la etapa central de la presente investigación, ya que permite operacionalizar el marco conceptual desarrollado previamente mediante la identificación de unidades territoriales susceptibles de análisis geoespacial. En este sentido, la delimitación de sistemas de montaña se concibe como un proceso analítico orientado a identificar unidades territoriales con coherencia geomorfológica, funcional y ambiental dentro del paisaje regional.

La literatura en estudios de montaña señala que la delimitación de las unidades de montaña requiere integrar múltiples variables topográficas derivadas de modelos digitales de elevación, particularmente altitud, pendiente y heterogeneidad del relieve. Estas variables permiten capturar los gradientes ambientales característicos de los sistemas montañosos, asociados a variaciones en temperatura, radiación solar, escorrentía y distribución de ecosistemas a lo largo del gradiente altitudinal (Körner, 2007). No obstante, algunos autores han señalado que la delimitación basada exclusivamente en altitud resulta insuficiente, dado que existen superficies elevadas con relieves suaves que no presentan las características geomorfológicas propias de ambientes montañosos, lo que puede generar sobreestimaciones en la identificación de estas unidades territoriales (Körner, et al., 2011).

Por esta razón, los enfoques metodológicos contemporáneos proponen integrar múltiples variables morfométricas derivadas de modelos digitales de elevación, lo que permite identificar zonas de montaña de manera más precisa y reproducible a distintas escalas espaciales. Este enfoque ha sido adoptado por diversas iniciativas internacionales de investigación en montaña, como el *Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA)* y *Mountain Research Initiative (MRI)*, las cuales recomiendan el uso combinado de variables como altitud y pendiente

del terreno para delimitar regiones montañosas en estudios comparativos a escala global (Snethlage, et al., 2022).

En el contexto de la Región del Biobío, la delimitación de sistemas de montaña requiere considerar además la organización geomorfológica regional del territorio. El relieve del Biobío presenta una estructura longitudinal característica del territorio chileno, organizada en grandes unidades fisiográficas que incluyen la planicie litoral, la Cordillera de la Costa, la depresión intermedia y la Cordillera de los Andes. Dentro de esta estructura, el dominio andino concentra los mayores gradientes altitudinales y constituye el principal sistema montañoso de la región, configurando cabeceras de cuenca, divisorias hidrográficas y gradientes climáticos asociados al relieve.

Considerando este contexto geomorfológico, la delimitación desarrollada en esta investigación se basó en un enfoque integrado que combina la interpretación de la estructura geomorfológica regional con el análisis de variables morfométricas derivadas de modelos digitales de elevación. De esta manera, la identificación de sistemas de montaña no se sustentó exclusivamente en umbrales topográficos aislados, sino en la convergencia entre la organización geomorfológica del territorio y las propiedades morfométricas del relieve.

El procedimiento metodológico se estructuró en dos etapas principales. En primer lugar, se definieron los criterios morfométricos utilizados para identificar áreas potencialmente montañosas a partir de variables topográficas derivadas del modelo digital de elevación. En segundo lugar, se procedió a la identificación espacial de unidades montañosas mediante el análisis integrado de dichas variables en entorno SIG, lo que permitió generar polígonos representativos de los sistemas de montaña presentes en la región.

3.3.1. Criterios morfométricos de delimitación de sistemas de montaña andinos

La delimitación geoespacial de sistemas de montaña mediante herramientas de análisis geográfico requiere establecer criterios cuantificables que permitan diferenciar áreas de relieve montañoso respecto de superficies planas o suavemente onduladas. En este sentido, se definió un conjunto de criterios morfométricos derivados del modelo digital de elevación *Copernicus DEM GLO-30*, considerando particularmente tres variables fundamentales: altitud, pendiente y rugosidad del terreno.

La selección de estas variables se fundamenta en la literatura especializada sobre sistemas de montaña, la cual señala que la delimitación de ambientes montañosos debe considerar la complejidad topográfica del relieve y no únicamente su posición altitudinal. En este contexto, la integración de múltiples variables morfométricas permite capturar de manera más precisa los gradientes ambientales y geomorfológicos característicos de los sistemas montañosos (Körner, 2007).

Altitud

La altitud constituye uno de los indicadores más utilizados en la identificación de ambientes montañosos, dado que refleja la posición vertical del relieve respecto del nivel del mar y se asocia directamente a gradientes climáticos, hidrológicos y ecológicos. En sistemas montañosos, el incremento altitudinal se relaciona con disminuciones progresivas de temperatura, variaciones en la disponibilidad hídrica y modificaciones en la estructura de los ecosistemas, configurando gradientes ambientales característicos del relieve montañoso (Körner, 2007).

En el contexto regional del Biobío, el aumento altitudinal hacia el sector cordillerano define una transición progresiva desde las superficies relativamente

planas de la depresión intermedia hacia las laderas y cumbres de la Cordillera de los Andes.

| Clase | Rango altitudinal (m.s.n.m.) ⁶ | Caracterización geomorfológica |
|-------|---|--|
| 1 | 0 – 400 | Planicies litorales y depresión intermedia |
| 2 | 400 – 800 | Piedemonte y transición precordillerana |
| 3 | 800 – 1200 | Precordillera andina |
| 4 | 1200 – 1600 | Cordillera media |
| 5 | > 1600 | Alta cordillera |

Tabla 2.- Clasificación altitudinal utilizada en la delimitación de sistemas de montaña. Elaboración propia.

Las clases presentadas en la tabla 2 permiten capturar la transición desde las planicies costeras y la depresión intermedia hacia los sectores de alta montaña andina, donde se concentran los mayores gradientes topográficos del territorio regional.

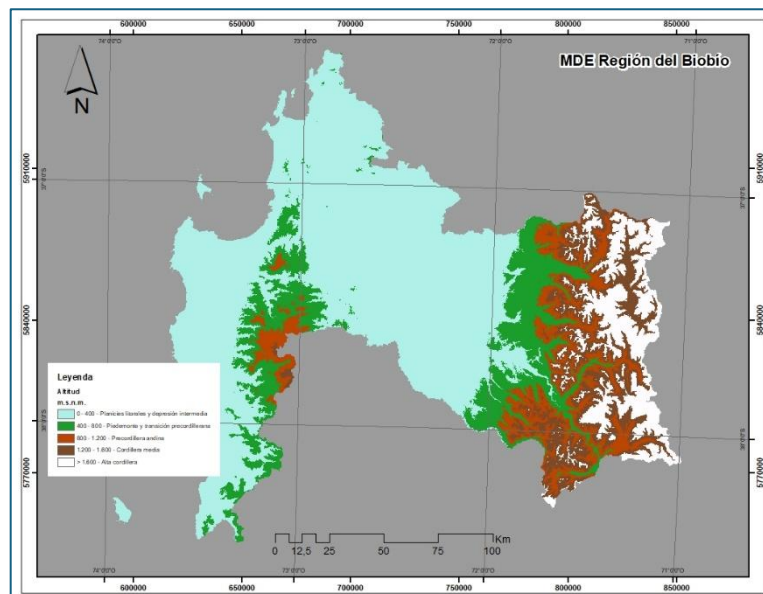


Figura 13.- Mapa de clasificación altitudinal de la Región del Biobío. Elaboración propia a partir de Copernicus DEM GLO-30.

⁶ Los rangos altitudinales fueron definidos considerando la morfología regional de la Región del Biobío y la literatura internacional sobre gradientes altitudinales en sistemas de montaña.

Sin embargo, como se ha señalado en la literatura especializada, la altitud por sí sola no resulta suficiente para identificar áreas montañosas, ya que existen superficies elevadas que presentan topografía relativamente plana (Körner, et al., 2011). Por esta razón, se incorporó la variable “pendiente” como segundo criterio morfométrico fundamental.

Pendiente

La pendiente representa la inclinación del terreno y constituye un indicador directo de la energía del relieve y de los procesos geomorfológicos asociados. Sectores con pendientes pronunciadas suelen estar asociados a procesos geomorfológicos activos, mayor escorrentía superficial y una mayor heterogeneidad ambiental, características propias de sistemas montañosos (Grohmann, 2015).

En esta investigación se definieron tres clases de pendiente:

| Clase | Rango pendiente (°)⁷ | Clasificación pendiente |
|--------------|--|--------------------------------|
| 1 | < 5° | Suave |
| 2 | 5° - 8° | Moderada |
| 3 | > 8° | Fuerte |

Tabla 3.- Clasificación de pendientes utilizada en la delimitación de sistemas de montaña.

Elaboración propia en base a Körner et al. (2011).

Esta clasificación permite diferenciar áreas suavemente onduladas de relieves más abruptos característicos de ambientes montañosos, facilitando la identificación de laderas y sectores con mayor complejidad geomorfológica.

⁷ Los rangos de pendiente fueron definidos considerando la morfología del relieve de la Región del Biobío y la literatura geomorfológica internacional sobre análisis de pendiente y caracterización de sistemas de montaña.

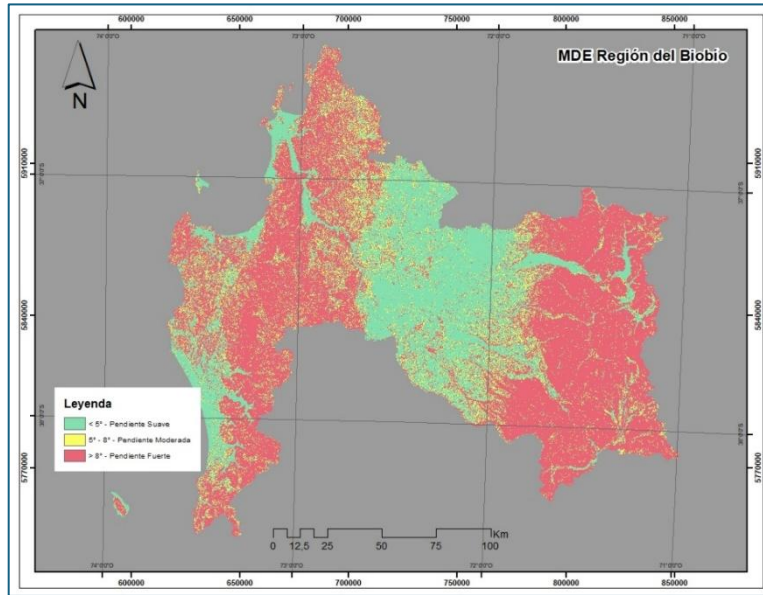


Figura 14.- Mapa de pendientes de la Región del Biobío. Elaboración propia a partir de Copernicus DEM GLO-30.

Rugosidad del terreno

De manera complementaria, se incorporó la rugosidad del terreno como indicador de heterogeneidad topográfica. La rugosidad expresa la variabilidad altitudinal dentro de una ventana espacial determinada y permite identificar áreas donde el relieve presenta cambios abruptos en distancias relativamente cortas.

| Clase | Rango rugosidad (adimensional) ⁸ | Interpretación |
|-------|---|----------------------------------|
| 1 | 0 – 10 | Superficies planas o casi planas |
| 2 | 10 - 25 | Relieve suavemente ondulado |
| 3 | 25 - 50 | Relieve de transición |
| 4 | 50 - 90 | Relieve irregular |
| 5 | 90 - 150 | Relieve montañoso |
| 6 | < 150 | Relieve abrupto |

Tabla 4.- Índice de rugosidad de terreno de sistemas de montaña. Elaboración propia a partir de Riley et al. (1999).

⁸ La rugosidad del terreno fue calculada mediante el Índice de Irregularidad del Terreno (*Terrain Ruggedness Index, TRI*) a partir del Modelo Digital de Elevación, permitiendo identificar sectores con distinta complejidad geomorfológica asociados a los sistemas de montaña

Este indicador resulta relevante en zonas de transición entre piedemonte y montaña, donde la altitud y la pendiente pueden presentar valores intermedios que dificultan la identificación directa de unidades montañosas. La incorporación de la rugosidad permite capturar la complejidad geomorfológica del territorio y mejorar la precisión de la delimitación espacial de sistemas de montaña (Snethlage, et al., 2022).

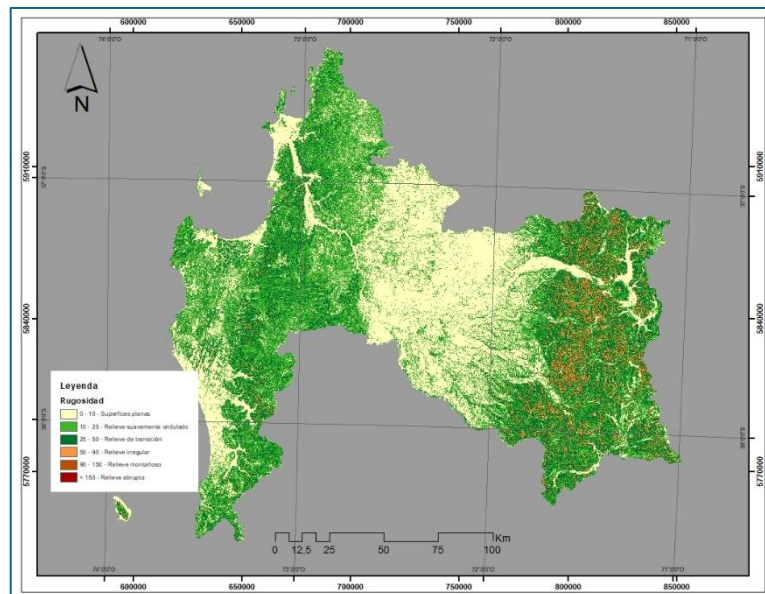


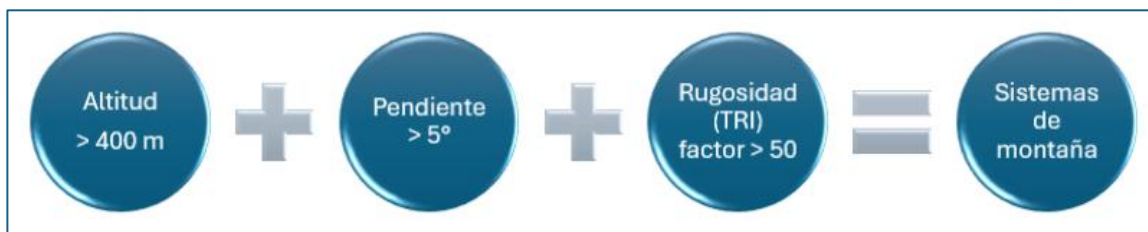
Figura 15.- Índice de rugosidad del terreno (TRI) de la Región del Biobío. Elaboración propia a partir de Copernicus DEM GLO-30.

Integración de criterios morfométricos

La integración de las variables altitud, pendiente y rugosidad permite representar de manera más precisa la complejidad geomorfológica del territorio, evitando que la delimitación dependa exclusivamente de un único parámetro topográfico. La combinación de estos criterios morfométricos constituye la base metodológica para la identificación espacial de los sistemas de montaña en la Región del Biobío.

Una vez definidos estos criterios, la siguiente etapa metodológica consistió en la identificación y delimitación geoespacial de las unidades montañosas mediante la integración de las variables derivadas del modelo digital de elevación en un

entorno de Sistemas de Información Geográfica. Este procedimiento permitió avanzar hacia la generación de unidades territoriales representativas de los sistemas de montaña andino.



*Figura 16.- Criterios geomorfológicos utilizados para la delimitación de los sistemas de montaña en la Región del Biobío.
Elaboración propia en base a Körner et al. (2011).*

A partir de la integración de estos criterios geomorfológicos, fue posible identificar áreas con mayor coherencia morfoestructural y complejidad topográfica, las cuales constituyen la base para la delimitación de sistemas de montaña como unidades territoriales funcionales dentro del paisaje regional.

3.3.2. Identificación y delimitación de sistemas de montaña

Definidos los criterios morfométricos de delimitación, la siguiente etapa consistió en la identificación y delimitación geoespacial de los sistemas de montaña de la Región del Biobío mediante la integración de las variables derivadas del modelo digital de elevación en un entorno SIG. Este procedimiento permitió traducir los criterios conceptuales previamente establecidos en unidades espaciales concretas, susceptibles de ser analizadas y caracterizadas mediante herramientas geoespaciales.

La delimitación se desarrolló a partir de la integración de las 3 variables morfométricas previamente definidas. La combinación de estas variables permitió identificar áreas con características geomorfológicas propias de sistemas de montaña, considerando tanto la posición altitudinal como la complejidad topográfica del relieve, en concordancia con los enfoques metodológicos

propuestos en la literatura reciente sobre delimitación de ambientes montañosos (Körner, et al., 2011).

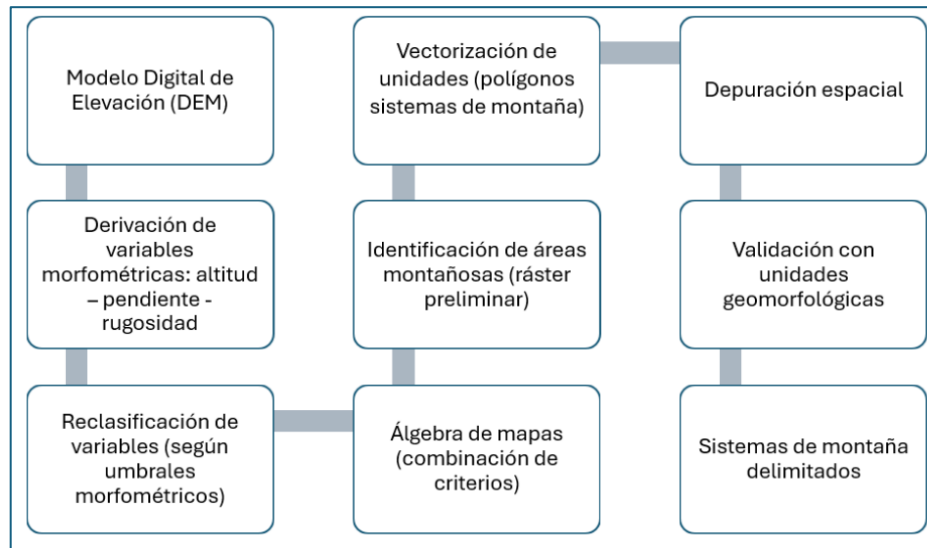
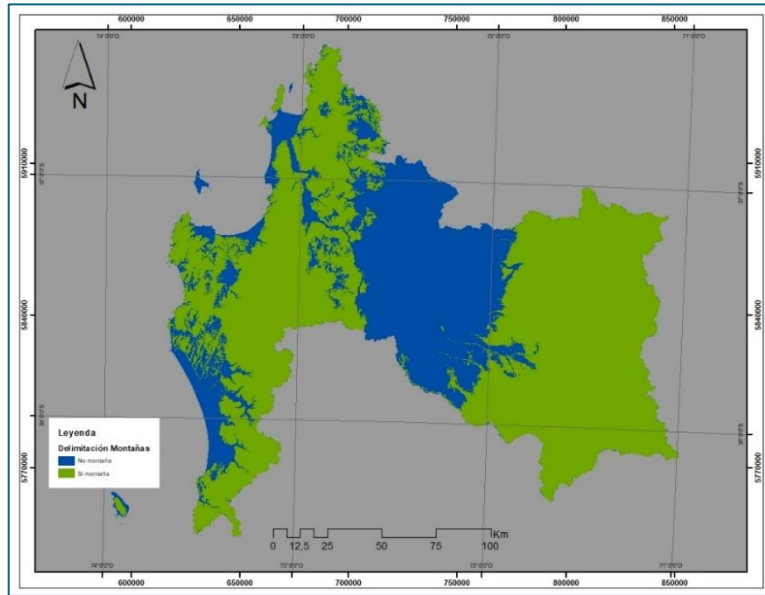


Figura 17.- Flujo metodológico para la delimitación espacial de sistemas de montaña. Elaboración propia.

El procedimiento metodológico se estructuró en una secuencia de análisis ráster orientada a generar una superficie preliminar de áreas montañosas dentro del territorio regional. En primer lugar, las capas de altitud, pendiente y rugosidad fueron reclasificadas de acuerdo con los umbrales definidos en el apartado anterior. Este proceso permitió estandarizar las variables y facilitar su posterior integración mediante operaciones de álgebra de mapas.

Posteriormente, la superficie resultante fue convertida a formato vectorial mediante herramientas de conversión ráster-vector disponibles en el entorno SIG utilizado en la investigación. Este proceso permitió generar polígonos continuos representativos de las áreas montañosas preliminares, facilitando su análisis posterior y la integración de variables territoriales adicionales.



*Figura 18.- Máscara preliminar de áreas de montaña.
Elaboración propia.*

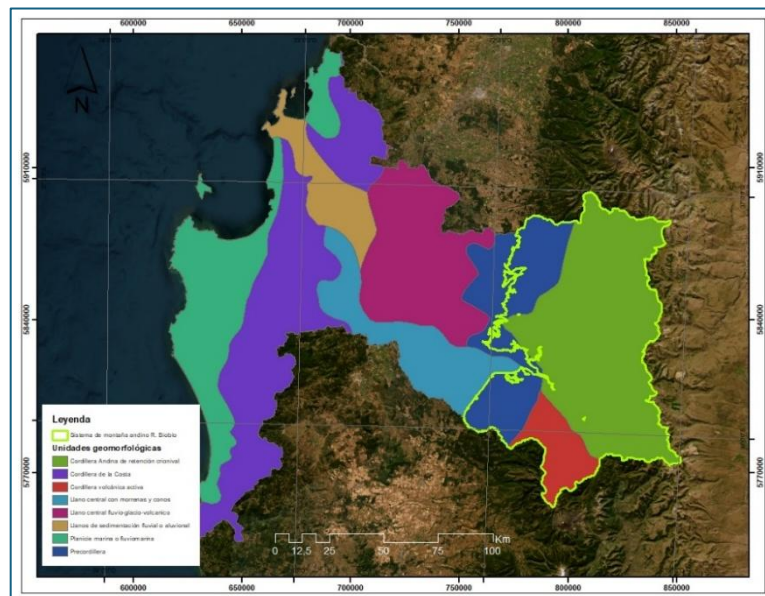


*Figura 19.- Máscara final áreas de montaña andina de la Región del Biobío.
Elaboración propia.*

Con el objetivo de mejorar la coherencia espacial de la delimitación, la máscara resultante fue sometida a procedimientos de depuración orientados a eliminar polígonos aislados no coherentes y reducir irregularidades espaciales generadas

por el proceso de reclasificación. Este procedimiento permitió consolidar áreas continuas de relieve montañoso andino y evitar la fragmentación artificial de unidades topográficas que forman parte de un mismo sistema geomorfológico como se presenta en la figura 19.

Una vez generada la delimitación preliminar, se incorporó la información geomorfológica regional mediante la intersección espacial entre las áreas montañosas identificadas y las unidades geomorfológicas existentes para la Región del Biobío.



*Figura 20.- Unidades geomorfológicas de la Región del Biobío.
Elaboración propia a partir de SRIIT, GORE Biobío*

La integración entre la delimitación morfométrica y la estructura geomorfológica regional permitió identificar unidades territoriales continuas con coherencia geomorfológica y funcional, las cuales fueron definidas como sistemas de montaña. Como resultado de este proceso, se delimitaron veinte unidades de sistemas de montaña dentro del territorio regional, las cuales representan áreas con características geomorfológicas homogéneas y con continuidad espacial dentro de la Cordillera de los Andes de la Región del Biobío.

Adicionalmente, cada uno de los sistemas de montaña identificados presenta un gradiente altitudinal estructurado en intervalos de 400 metros, lo que permitió definir pisos altitudinales al interior de cada unidad. Esta clasificación altitudinal facilita la caracterización de gradientes ambientales y geomorfológicos dentro de los sistemas de montaña, permitiendo posteriormente integrar variables climáticas, ecológicas y territoriales asociadas a las distintas cotas altitudinales.

El flujo metodológico de identificación y delimitación de los sistemas de montaña utilizados en esta investigación se presenta en la figura 21.



Figura 21.- Flujo metodológico de delimitación de sistemas de montaña. Elaboración propia.

3.4. Construcción de la base de datos geoespacial

Una vez delimitados los sistemas de montaña, se procedió al procesamiento e integración geoespacial de la información territorial y climática, con el fin de construir una base de datos geoespacial unificada para cada unidad de análisis. Esta etapa permitió transformar los sistemas de montaña previamente definidos en entidades analíticas comparables, integrando variables físicas, climáticas,

ecológicas y socioespaciales. La base resultante constituyó el soporte técnico y analítico del visor web y del *dashboard* geoespacial desarrollados en esta investigación.

El procesamiento de variables se desarrolló a partir de la recopilación, estandarización y preparación de capas geoespaciales provenientes de las fuentes de información referidas en los apartados anteriores. Dichas capas ya normalizadas en ambiente SIG para asegurar consistencia en sistema de coordenadas, extensión territorial y formato de los datos fueron intersectadas con los polígonos de los sistemas de montaña delimitados, permitiendo asignar atributos específicos a cada unidad territorial. Mediante este procedimiento se incorporó información geomorfológica, hidrológica, ecológica y socioespacial a cada sistema de montaña, consolidando así una primera estructura de atributos territoriales para la base de datos geoespacial.

Las variables climáticas de temperatura y precipitación fueron procesadas mediante análisis espacial en *ArcGIS*, utilizando datos provenientes de *CR2* y *MODIS*. Su incorporación tuvo como objetivo caracterizar la variabilidad climática de los sistemas de montaña desde dos aproximaciones complementarias: temperatura del aire y precipitación, por una parte, y temperatura superficial del terreno, por otra.

El resultado de este procesamiento fue la generación de tablas climáticas con estructura temporal, donde cada registro correspondió a un sistema de montaña, un año y un mes, incorporando valores medios de temperatura del aire, precipitación, temperatura superficial diurna y temperatura superficial nocturna.

Una vez procesadas las variables territoriales y climáticas, se procedió a la construcción de una base de datos geoespacial integrada. Para ello, las tablas derivadas del análisis climático fueron exportadas y estructuradas en formato tabular, organizando la información según nombre del sistema de montaña, año, mes y variables climáticas asociadas.

La vinculación entre la información tabular y la capa espacial de sistemas de montaña se realizó mediante un identificador nominal único correspondiente al nombre de cada unidad territorial. Este campo de unión permitió relacionar los atributos climáticos con los polígonos previamente delimitados, garantizando el funcionamiento dinámico del visor web y del *dashboard* geoespacial. A partir de esta integración, fue posible desplegar automáticamente series temporales de precipitación, temperatura del aire y temperatura superficial para cada sistema de montaña seleccionado.

Finalmente, se verificó la consistencia de los registros y la correspondencia entre tablas y polígonos, asegurando que cada sistema de montaña contara con información completa y correctamente vinculada. Este procedimiento permitió consolidar una base de datos geoespacial integrada, en la cual cada sistema de montaña quedó definido como una unidad territorial analítica, con atributos comparables y operativos para su representación en entorno web.

3.5. Desarrollo de productos SIG interactivos

Una vez construida la base de datos geoespacial integrada, se procedió al desarrollo del visor geoespacial interactivo de sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío orientada a la exploración y análisis de los sistemas de montaña previamente delimitados.

El desarrollo del visor se estructuró en dos componentes principales: el mapa web interactivo y el *dashboard* geoespacial. Ambos elementos fueron implementados en la plataforma *ArcGIS Online*, permitiendo la visualización dinámica de los sistemas de montaña y la exploración comparativa de las unidades territoriales. Este enfoque metodológico se desarrolla en la utilidad que prestan las plataformas geoespaciales interactivas para el análisis territorial de sistemas de montaña y el apoyo a la toma de decisiones ambientales (Shahgedanova, et al., 2021).

Metodológicamente, el mapa web fue elaborado a partir de la capa de sistemas de montaña, definida como la unidad territorial principal de análisis. Sobre esta base se integraron las capas derivadas del inventario geoespacial, organizadas de acuerdo con las dimensiones temáticas establecidas en la investigación: física-geomorfológica, ecológica, hídrica, climática, socioespacial y de presión o vulnerabilidad territorial. Para ello, se consideraron criterios de publicación, ordenamiento, simbología, jerarquización temática y consulta de atributos, con el propósito de asegurar una representación espacial coherente de la información territorial.

Posteriormente, a partir del mapa web configurado, se desarrolló el *dashboard* geoespacial como herramienta de síntesis y consulta integrada. Su construcción consideró la vinculación entre la capa territorial principal, las tablas derivadas del procesamiento geoespacial y los indicadores seleccionados para caracterizar los sistemas de montaña. La interfaz fue organizada mediante elementos de selección territorial, visualización cartográfica, indicadores y gráficos temáticos, permitiendo articular información espacial y alfanumérica en una plataforma única.

Finalmente, la integración de indicadores se realizó mediante la asociación de variables morfométricas, climáticas, ecológicas y socioespaciales a los polígonos de sistemas de montaña. Para ello se emplearon procedimientos de análisis espacial, estadísticas zonales e intersecciones vectoriales, según la naturaleza de cada variable incorporada. Esta etapa permitió transformar la base de datos geoespacial en una herramienta de consulta territorial integrada, orientada a visualizar patrones generales, contrastes espaciales y relaciones entre variables relevantes para el análisis de los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío.

4. Resultados

4.1. Delimitación de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío

La delimitación territorial desarrollada permitió identificar 20 unidades de sistemas de montaña en el sector andino de la Región del Biobío, organizadas a partir de la combinación entre unidades geomorfológicas y rangos altitudinales. Estas unidades constituyen la base territorial del inventario geoespacial y del visor interactivo, definiendo las unidades espaciales sobre las cuales se integra la información biofísica, climática y socioespacial.

El análisis permitió distinguir tres grandes conjuntos territoriales: Precordillera, Cordillera volcánica activa y Cordillera Andina de retención crionival. Cada uno de estos conjuntos fue subdividido según rangos altitudinales, permitiendo estructurar el territorio en unidades discretas y comparables. De esta forma, la delimitación no solo permitió reconocer la distribución espacial de la montaña andina regional, sino también diferenciar su organización interna en función de gradientes altitudinales y condiciones geomorfológicas.

| N° | Sistema de montaña | Rango altitudinal |
|----|-----------------------------|-------------------|
| 01 | Precordillera | 0 – 400 m |
| 02 | Precordillera | 400 – 800 m |
| 03 | Precordillera | 800 – 1.200 m |
| 04 | Precordillera | 1.200 – 1.600 m |
| 05 | Precordillera | 1.600 – 2.000 m |
| 06 | Cordillera volcánica activa | 400 – 800 m |
| 07 | Cordillera volcánica activa | 800 – 1.200 m |
| 08 | Cordillera volcánica activa | 1.200 – 1.600 m |
| 09 | Cordillera volcánica activa | 1.600 – 2.000 m |

| N° | Sistema de montaña | Rango altitudinal |
|-----------|--|--------------------------|
| 10 | Cordillera volcánica activa | 2.000 – 2.400 m |
| 11 | Cordillera volcánica activa | 2.400 – 2.800 m |
| 12 | Cordillera Andina de retención crionival | 0 – 400 m |
| 13 | Cordillera Andina de retención crionival | 400 – 800 m |
| 14 | Cordillera Andina de retención crionival | 800 – 1.200 m |
| 15 | Cordillera Andina de retención crionival | 1.200 – 1.600 m |
| 16 | Cordillera Andina de retención crionival | 1.600 – 2.000 m |
| 17 | Cordillera Andina de retención crionival | 2.000 – 2.400 m |
| 18 | Cordillera Andina de retención crionival | 2.400 – 2.800 m |
| 19 | Cordillera Andina de retención crionival | 2.800 – 3.200 m |
| 20 | Cordillera Andina de retención crionival | > 3.200 m |

*Tabla 5.- Sistemas de montaña andinos desarrollados en el análisis territorial.
Elaboración propia.*

La delimitación evidencia una organización territorial clara en sentido oeste–este. La Precordillera se asocia principalmente a los sectores de menor altitud y transición entre el valle central y la montaña andina; la Cordillera volcánica activa se concentra en sectores intermedios y altos, vinculados a formas del relieve de origen volcánico; mientras que la Cordillera Andina de retención crionival se localiza preferentemente en los sectores de mayor altitud, donde adquieren mayor relevancia las condiciones climáticas frías, la acumulación nival y los procesos asociados a ambientes de alta montaña.

Desde una perspectiva territorial, los resultados muestran que la cordillera andina de la Región del Biobío presenta una estructura heterogénea, conformada por unidades diferenciadas en términos altitudinales y geomorfológicos. Esta diferenciación permite analizar los sistemas de montaña como unidades

territoriales funcionales, facilitando su comparación, caracterización e integración en el inventario geoespacial desarrollado.

La figura 22 presenta la delimitación final de los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío, evidenciando la distribución espacial de las 20 unidades identificadas y su organización territorial en función de los conjuntos geomorfológicos y rangos altitudinales definidos.

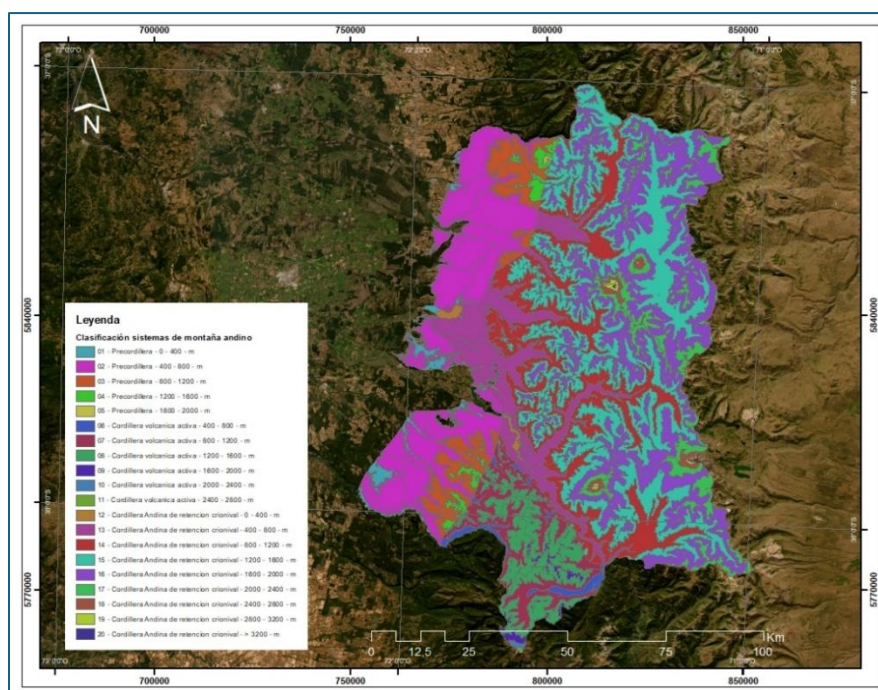


Figura 22.- Delimitación final de sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío. Elaboración propia.

4.2. Inventario geoespacial de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío

A partir de la delimitación territorial, se construyó un inventario geoespacial integrado de los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío. Este inventario consolidó información territorial proveniente de diversas fuentes geoespaciales, estructurada bajo un enfoque multidimensional orientado a

caracterizar las condiciones biofísicas, climáticas, hídricas, ecológicas, socioespaciales y de presión presentes en el área de estudio.

La organización del inventario se realizó en torno a seis dimensiones temáticas principales: climática, ecológica, física, hídrica, presión y socioespacial. Adicionalmente, se incorporó la capa central de sistemas de montaña delimitados, imágenes ráster derivadas del modelo digital de elevación y tablas de datos climáticos procesados a partir de series CR2 y MODIS. Esta estructura permitió ordenar la información en una *geodatabase* integrada, facilitando su posterior análisis, consulta y visualización en el visor geoespacial y en el *dashboard* interactivo.

| Componente | Información incorporada | Acción en inventario |
|----------------------------|---|--|
| Dimensión climática | Clasificación climática de Köppen-Geiger, distritos agroclimáticos, estaciones meteorológicas, temperatura superficial MODIS, temperatura CR2 y precipitación CR2 mensual y anual | Caracterizar la variabilidad climática de los sistemas de montaña |
| Dimensión ecológica | Áreas protegidas del Estado, ecosistemas vegetacionales, formaciones vegetacionales de Gajardo, pisos vegetacionales de Pliscoff y reserva de la biosfera | Identificar la diversidad ecológica y su relación con gradientes ambientales |
| Dimensión física | Fallas geológicas, unidades geomorfológicas, geología regional y volcanes | Caracterizar la estructura física y geomorfológica del territorio |
| Dimensión hídrica | Cuencas, subcuencas, subsubcuencas, red hidrográfica, cuerpos | Analizar el rol de los sistemas de montaña en |

| | | |
|--|---|--|
| | lacustres, estaciones fluviométricas, humedales y glaciares | la regulación hídrica regional |
| Dimensión de presión | Amenaza volcánica, erosión actual y evaluación de ecosistemas vegetacionales | Identificar amenazas, presiones y condiciones de vulnerabilidad ambiental |
| Dimensión socioespacial | Comunas, edificación rural, ocupación de tierras, población y hogares del Censo 2024, red vial, servicios y equipamientos | Analizar la interacción entre sistemas de montaña, ocupación humana y organización territorial |
| Sistemas de montaña delimitados | Capa final de unidades territoriales de montaña | Constituir la unidad espacial principal de análisis e integración de variables |
| Imágenes ráster | Modelo digital de elevación y derivados geomorfométricos | Apoyar la delimitación y caracterización física de los sistemas de montaña |
| Tablas climáticas | Series procesadas de temperatura y precipitación CR2 y MODIS | Vincular información climática temporal a cada sistema de montaña |

*Tabla 6.- Estructura temática del inventario geoespacial
Elaboración propia*

La dimensión climática integra información orientada a caracterizar las condiciones atmosféricas y térmicas del territorio andino regional. Esta componente incluye capas de clasificación climática, distritos agroclimáticos y estaciones meteorológicas, junto con series climáticas procesadas de temperatura superficial *MODIS*, temperatura del aire CR2 y precipitación CR2. La incorporación de estas variables permitió representar la variabilidad climática de los sistemas de montaña y su comportamiento en relación con los gradientes altitudinales.

La dimensión ecológica reúne información ambiental relevante para caracterizar la diversidad de ecosistemas presentes en los sistemas de montaña. En esta dimensión se integraron áreas protegidas del Estado, ecosistemas vegetacionales, formaciones vegetacionales⁹, pisos vegetacionales¹⁰ y la reserva de la biosfera. Estas capas permiten reconocer la relación entre la estructura ecológica regional, los gradientes ambientales y las unidades de montaña delimitadas.

La dimensión física incorpora variables geológicas y geomorfológicas del territorio, tales como fallas geológicas, unidades geomorfológicas, geología regional y volcanes. Esta información permite analizar la configuración física de la cordillera andina del Biobío y comprender su relación con la delimitación de los sistemas de montaña.

La dimensión hídrica integra información asociada a la red hidrográfica y a las unidades de drenaje presentes en el área de estudio. Esta componente incluye cuencas, subcuencas, subsubcuencas, cuerpos lacustres, estaciones fluviométricas, humedales y glaciares. Su incorporación permite analizar el rol de los sistemas de montaña como espacios estratégicos para la regulación hídrica regional y como cabeceras funcionales de cuenca.

La dimensión de presión incorpora variables asociadas a amenazas naturales y procesos de transformación territorial, tales como amenaza volcánica, erosión actual y evaluación de ecosistemas vegetacionales. Esta dimensión permite reconocer condiciones de vulnerabilidad ambiental y posibles factores de presión sobre los sistemas de montaña.

⁹ La clasificación de formaciones vegetacionales propuesta por Gajardo corresponde a un sistema de regionalización ecológica para Chile basado en criterios fisionómicos, florísticos y bioclimáticos, permitiendo identificar unidades homogéneas de vegetación a escala nacional (Gajardo, 1994).

¹⁰ La clasificación de pisos de vegetación de Luebert y Pliscoff corresponde a una regionalización bioclimática de Chile basada en la relación entre clima, altitud y distribución de especies vegetales, permitiendo identificar unidades ecológicas que reflejan gradientes ambientales a escala nacional (Luebert & Pliscoff, 2017).

La dimensión socioespacial integra variables vinculadas a la ocupación humana, la conectividad y la organización territorial. En ella se incorporaron capas de comunas, edificación rural, ocupación de tierras, población y hogares del Censo 2024, red vial, servicios y equipamientos. Esta información permite analizar la interacción entre los sistemas de montaña y las dinámicas territoriales presentes en la Región del Biobío.

La capa central del inventario corresponde a los sistemas de montaña delimitados, los cuales constituyen la unidad territorial principal sobre la que se integran las distintas variables temáticas. Esta capa permite vincular la información biofísica, climática, hídrica, ecológica y socioespacial a cada unidad de montaña, facilitando su comparación y análisis territorial.

Adicionalmente, la *geodatabase* incorpora imágenes ráster derivadas del modelo digital de elevación, utilizadas para la delimitación y caracterización geomorfológica de los sistemas de montaña, junto con tablas de datos climáticos asociadas a temperatura y precipitación. En conjunto, estos componentes permiten consolidar una base de información territorial sistemática, comparable y funcional para el desarrollo del visor geoespacial y del *dashboard* interactivo.

4.3. Visor geoespacial de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío

El visor geoespacial de sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío fue desarrollado a partir de la capa de sistemas de montaña, la cual constituye la unidad territorial principal de análisis. Sobre esta capa base se integraron las distintas variables territoriales derivadas del inventario geoespacial, permitiendo visualizar la estructura territorial de cada sistema de montaña y su heterogeneidad ambiental.

Las capas geoespaciales fueron organizadas en grupos temáticos, con el objetivo de facilitar la exploración territorial y la visualización de las distintas dimensiones

analíticas. Esta organización permitió estructurar la información en cinco dimensiones principales: variables físicas y geomorfológicas, variables ecológicas, variables del medio hídrico, variables climáticas y variables socioespaciales. Adicionalmente, se incorporó un grupo de presión y vulnerabilidad, orientado a la visualización de amenazas ambientales y riesgos territoriales asociados a los sistemas de montaña.

Esta organización temática permitió estructurar la información territorial de forma jerárquica y facilitar la exploración dinámica de los sistemas de montaña. De esta manera, el mapa web funciona como plataforma de visualización del inventario geoespacial, permitiendo analizar la distribución espacial de las variables y la heterogeneidad territorial de la cordillera andina del Biobío.

El visor geoespacial desarrollado permite explorar la información a distintas escalas territoriales, desde una visión regional de conjunto hasta análisis específicos de cada unidad de montaña. Entre sus principales funcionalidades se incluyen la visualización interactiva de los sistemas de montaña, la activación y desactivación de capas temáticas, la consulta de atributos territoriales, la exploración por dimensiones de análisis y la navegación territorial a escala regional.

Los resultados muestran que la integración de variables territoriales en una plataforma geoespacial interactiva permite identificar patrones espaciales asociados a los gradientes altitudinales, la distribución climática, las condiciones ecológicas, el medio hídrico y la ocupación territorial. Asimismo, el visor permite reconocer relaciones espaciales entre los sistemas de montaña y variables ambientales relevantes, facilitando una lectura comparativa de la cordillera andina regional.

En este sentido, el visor opera como una herramienta de exploración territorial del inventario geoespacial, ya que permite visualizar los sistemas de montaña,

consultar variables territoriales, explorar dimensiones temáticas y comparar unidades espaciales previamente delimitadas.

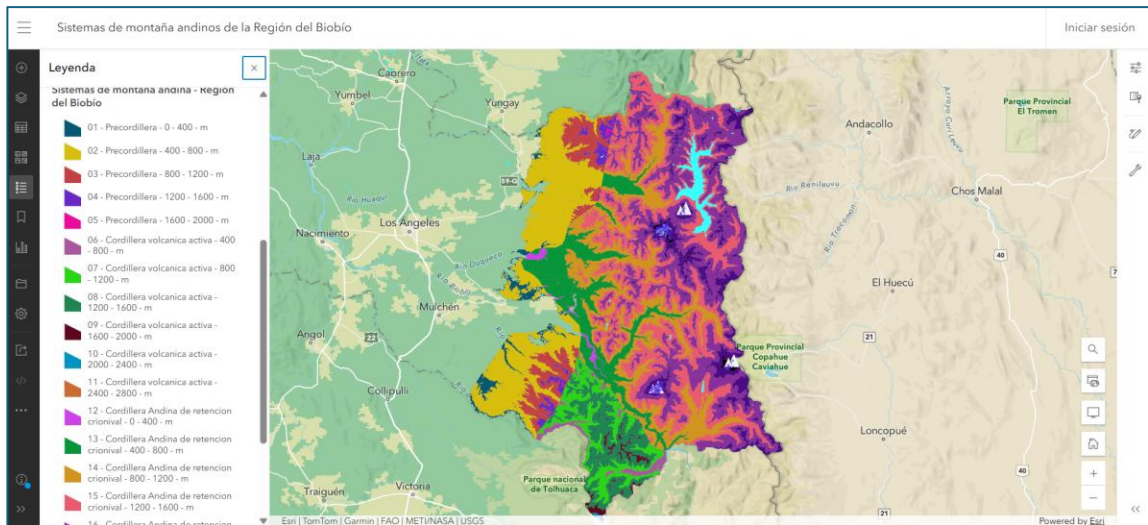


Figura 23.- Visor geoespacial de sistemas de montaña de la Región del Biobío. Elaboración propia.

4.4. Dashboard territorial de sistemas de montaña andino de la Región del Biobío

A partir del inventario geoespacial y del visor web interactivo, se desarrolló un *dashboard* geoespacial orientado a integrar, sintetizar y analizar de manera dinámica las variables territoriales asociadas a los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío. Esta herramienta constituye uno de los principales resultados de la investigación, ya que permite representar información multidimensional en una plataforma interactiva, facilitando la exploración territorial y el análisis comparativo entre unidades de montaña.

El *dashboard* se estructura en torno a la capa de sistemas de montaña, definida como la unidad territorial principal de consulta. A partir de la selección de cada sistema, la plataforma actualiza automáticamente los indicadores, gráficos, tablas y elementos cartográficos asociados, permitiendo visualizar de manera integrada

las características geomorfológicas, climáticas, ecológicas y socioespaciales de cada unidad territorial.

La estructura general del *dashboard* fue diseñada para facilitar la consulta territorial mediante un panel lateral de selección de sistemas de montaña, un panel cartográfico central y distintos módulos de visualización de información. Esta organización permite que cada sistema de montaña pueda ser analizado individualmente, manteniendo al mismo tiempo una lectura comparativa respecto del conjunto de unidades delimitadas.

La figura 24 muestra la estructura general del *dashboard* geoespacial, donde se observa el selector de sistemas de montaña, el panel cartográfico central, los indicadores territoriales y los gráficos climáticos integrados. Esta disposición permite visualizar la información territorial de manera simultánea y facilita la exploración comparativa entre sistemas de montaña.

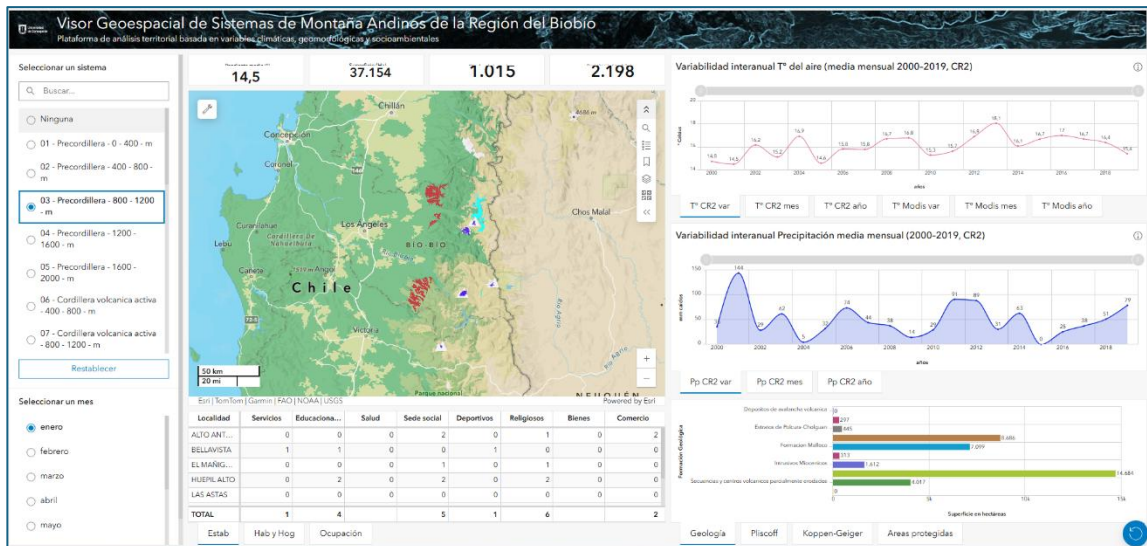


Figura 24.- Estructura general del dashboard geoespacial.
 Elaboración propia.

El *dashboard* incorpora indicadores sintéticos que permiten caracterizar cada sistema de montaña a partir de variables morfométricas y climáticas. Entre los principales indicadores integrados se encuentran la pendiente media, superficie, altitud media y precipitación media, los cuales permiten sintetizar las características físicas de cada unidad territorial. Asimismo, se incorporaron gráficos climáticos dinámicos construidos a partir de datos procesados desde las bases CR2 y MODIS, permitiendo visualizar la variabilidad temporal de temperatura y precipitación.

Los resultados evidencian que los sistemas de montaña presentan variabilidad climática y morfométrica asociada a los gradientes altitudinales y a su distribución territorial dentro de la cordillera andina regional. La integración simultánea de indicadores físicos y variables climáticas permite analizar estos sistemas como unidades territoriales complejas, donde la topografía y el clima interactúan en la configuración de condiciones ambientales diferenciadas.

La integración simultánea de indicadores morfométricos y variables climáticas permite analizar los sistemas de montaña como unidades territoriales complejas, donde la topografía y el clima interactúan para definir condiciones ambientales diferenciadas.

La figura 25 muestra la integración de indicadores morfométricos y gráficos climáticos para un sistema de montaña seleccionado. Esta visualización permite observar simultáneamente las características físicas de la unidad territorial y la variabilidad climática mensual e interanual asociada a datos de precipitación y temperatura.

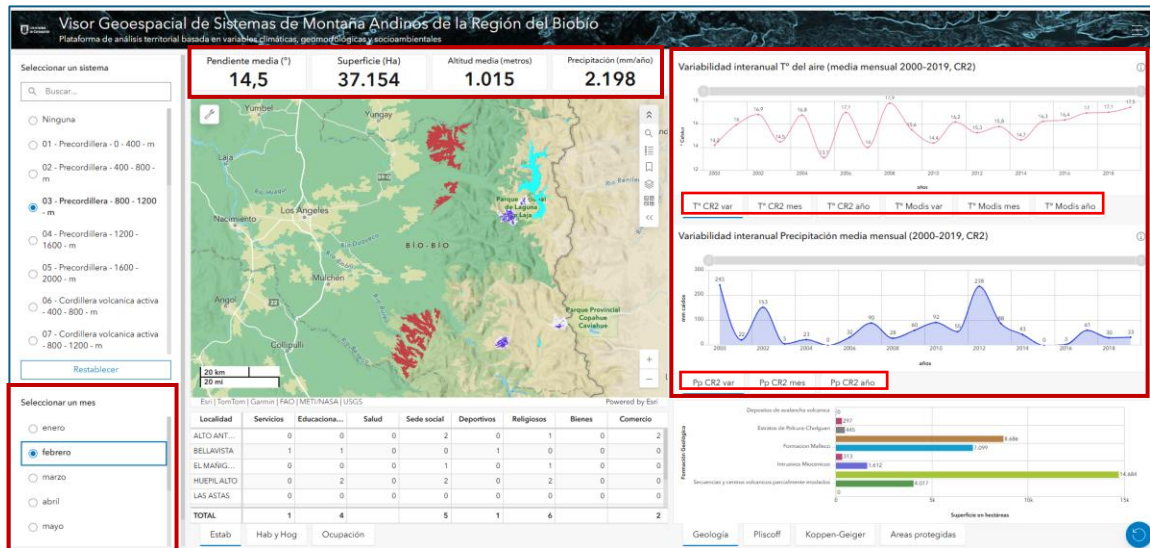


Figura 25.- Visualización de indicadores y variables climáticas en el dashboard. Elaboración propia.

Además de las variables físicas y climáticas, el *dashboard* incorpora información territorial y socioespacial que permite analizar la relación entre los sistemas de montaña y la ocupación humana. Estas variables incluyen antecedentes sobre localidades, servicios, infraestructura y ocupación territorial, lo que permite reconocer la presencia humana dentro de las unidades delimitadas y su distribución espacial.

La incorporación de esta dimensión permite visualizar la presencia humana dentro de los sistemas de montaña y su distribución territorial. Este enfoque resulta relevante para comprender los sistemas de montaña como territorios socioecológicos, donde interactúan dinámicas naturales y humanas.

Asimismo, la herramienta incorpora pestañas temáticas orientadas a la visualización de distintas dimensiones territoriales, tales como geología, formaciones vegetacionales, clasificación climática y áreas protegidas. Esta estructura permite explorar la complejidad territorial de los sistemas de montaña y reconocer su heterogeneidad ambiental desde una perspectiva integrada.

La figura 26 muestra la integración de variables físicas, ambientales y socioespaciales en el *dashboard*, permitiendo visualizar la relación entre los sistemas de montaña, sus condiciones territoriales y los elementos de ocupación humana presentes en cada unidad.

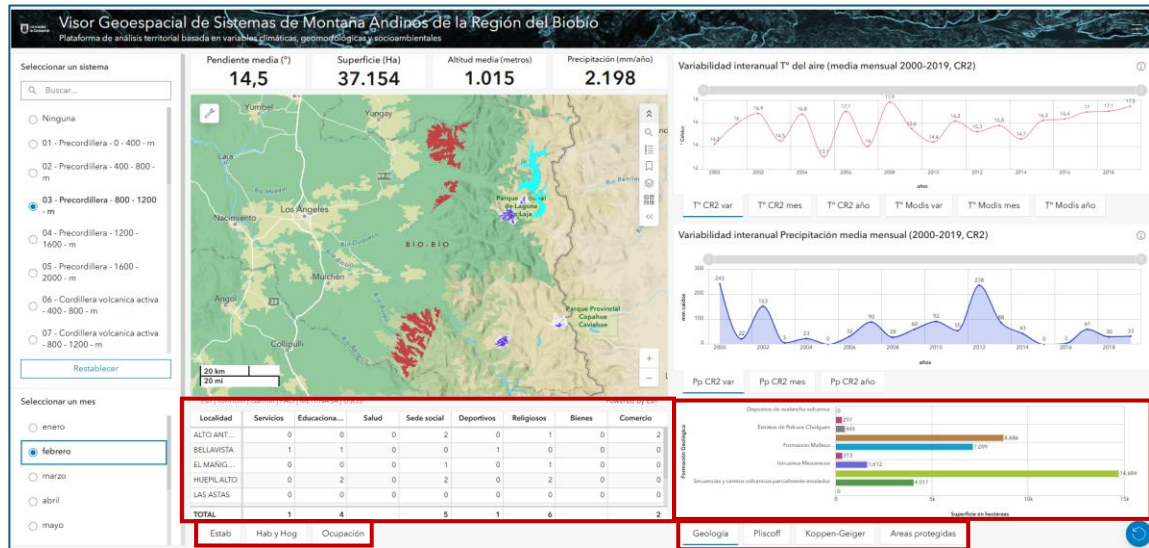


Figura 26.- Visualización de variables físicas y socioespaciales en el *dashboard*.
 Elaboración propia.

En síntesis, el *dashboard* geoespacial desarrollado permite integrar múltiples dimensiones territoriales en una plataforma de análisis dinámico, facilitando la comparación entre sistemas de montaña y la identificación de patrones espaciales. Desde una perspectiva territorial, los resultados evidencian diferencias relevantes entre las unidades delimitadas en términos geomorfológicos, climáticos, ecológicos y socioespaciales.

5. Discusión

Uno de los principales hallazgos de esta investigación corresponde a la identificación de una ausencia de delimitaciones territoriales sistemáticas de los sistemas de montaña en la Región del Biobío, lo que ha contribuido a una

fragmentación del conocimiento y a una limitada incorporación de estos territorios en la planificación ambiental y territorial. Este resultado es consistente con lo señalado en la literatura revisada, donde se reconoce que los sistemas de montaña han sido históricamente subrepresentados en los sistemas de monitoreo y en los instrumentos de planificación territorial, pese a su relevancia ecológica e hidrológica (Pepin, et al., 2015).

En este contexto, la delimitación de 20 sistemas de montaña bajo criterios morfométricos permite avanzar hacia una representación territorial más precisa de la cordillera andina regional. Este resultado refuerza la idea de que la cordillera no constituye un sistema homogéneo, sino un conjunto de unidades territoriales diferenciadas, con dinámicas geomorfológicas y climáticas propias. Esta interpretación resulta coherente con los enfoques contemporáneos de la montología, donde las montañas son entendidas como sistemas socioecológicos complejos y heterogéneos, caracterizados por gradientes ambientales y dinámicas territoriales diferenciadas (Thornton, et al., 2021).

Sin embargo, la delimitación territorial basada en criterios morfométricos también presenta limitaciones. Si bien permite establecer unidades espaciales objetivas, estas delimitaciones no necesariamente capturan todas las dinámicas funcionales de los sistemas de montaña, particularmente aquellas relacionadas con procesos socioecológicos o dinámicas hidrológicas complejas. En este sentido, los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación territorial inicial, susceptible de ser complementada con otras variables funcionales y ecológicas en futuras investigaciones.

Otro aspecto relevante corresponde a la utilización de datos climáticos modelados y satelitales para caracterizar los sistemas de montaña. La escasez de estaciones meteorológicas en zonas cordilleranas ha sido ampliamente documentada a nivel global, lo que limita la comprensión de los procesos climáticos en ambientes de montaña (Pepin, et al., 2015). En este contexto, el

uso de datos CR2 y MODIS permitió generar información territorialmente explícita, aunque estos productos también presentan incertidumbres asociadas a su resolución espacial y a la modelación de variables climáticas en zonas de alta complejidad topográfica.

A pesar de estas limitaciones, la integración del inventario geoespacial y del visor interactivo permitió avanzar hacia una representación territorial integrada de los sistemas de montaña. Este resultado sugiere que las herramientas geoespaciales y las plataformas digitales constituyen instrumentos relevantes para la visualización territorial y la integración de información ambiental, particularmente en contextos donde la información se encuentra dispersa entre distintas instituciones.

En este sentido, la investigación permite discutir la necesidad de avanzar hacia enfoques territoriales integrados para el análisis de sistemas de montaña, donde la delimitación espacial, la integración de variables y la visualización geoespacial permitan comprender estos territorios como unidades funcionales. Este enfoque resulta relevante en el contexto del cambio climático, donde los sistemas de montaña cumplen un rol clave en la regulación hídrica, la provisión de servicios ecosistémicos y la generación de riesgos naturales.

6. Conclusiones

La presente investigación permitió desarrollar un inventario geoespacial de los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío mediante la integración de análisis morfométricos, información territorial y herramientas geoespaciales, con el objetivo de delimitar, caracterizar y visualizar estos territorios como unidades funcionales. Los resultados obtenidos permiten avanzar en la comprensión territorial de la cordillera andina regional y contribuir a su incorporación en procesos de planificación ambiental y territorial.

En primer lugar, la delimitación territorial permitió identificar 20 sistemas de montaña andinos en la Región del Biobío, definidos a partir de criterios geomorfológicos y rangos altitudinales. Esta delimitación evidenció la heterogeneidad interna de la cordillera andina regional, permitiendo reconocer los sistemas de montaña como unidades territoriales diferenciadas. Este resultado constituye un aporte conceptual relevante, ya que permite superar aproximaciones tradicionales que representan la montaña como un territorio homogéneo y avanzar hacia una comprensión territorial más integrada.

En segundo lugar, la construcción del inventario geoespacial integrado permitió consolidar información biofísica, climática, ecológica y socioespacial asociada a los sistemas de montaña. La integración de estas variables permitió generar una base de datos territorial estructurada, facilitando la comprensión de la complejidad de estos territorios y su rol en la regulación hídrica, la provisión de servicios ecosistémicos y la sostenibilidad regional.

Finalmente, el desarrollo del visor web interactivo y del *dashboard* geoespacial permitió sintetizar y visualizar la información territorial de manera integrada. Estas herramientas permiten explorar los sistemas de montaña mediante indicadores territoriales, gráficos climáticos y variables espaciales, facilitando su análisis y su utilización en procesos de planificación territorial y gestión ambiental.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la delimitación territorial, la construcción del inventario geoespacial y el desarrollo de herramientas de visualización interactiva constituyen un aporte metodológico y territorial relevante para la comprensión de los sistemas de montaña andinos de la Región del Biobío. Asimismo, la investigación contribuye a reducir los vacíos de información existentes específicamente en sistemas de montaña, los cuales históricamente han presentado una fragmentación del conocimiento y una limitada disponibilidad de información territorial integrada. La consolidación de variables biofísicas, climáticas, ecológicas y socioespaciales en una base de

datos estructurada y en plataformas digitales permite avanzar hacia una comprensión territorial más sistemática de estos territorios.

Los productos desarrollados en el marco de este trabajo se encuentran alojados en los siguientes enlaces:

- Mapa *web* interactivo:
[Mapa web sistemas de montaña andinos Región del Biobío](#)
- *Dashboard* geoespacial:
[Dashboard sistemas de montaña andinos Región del Biobío](#)
- *Geodatabase Inventario geoespacial*
- [Inventario geoespacial sistemas de montaña](#)

7. Bibliografía

7.1. Bibliografía de literatura

- Adler, C., Palazzi, E., Kulonen, A., Balsiger, J., Colangeli, G., Cripe, D., Zebisch, M. (2020). Monitoring Mountains in a Changing World: New Horizons for the Global Network for Observations and Information on Mountain Environments (GEO-GNOME). *Mountain Research and Development*, 40(3). doi:<https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-8-00065.1>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P., Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817 - 2846. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Ao, L., Wu, Y., Xu, Q., Huang, G., Zheng, J., Dai, J., Chen, H. (2024). Subsurface flow aggravates the soil erosion on steep slopes in karst post-mining areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101667>
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L., Coppola, E., Eckert, N., Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12, 759 - 794. doi:<https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- DGA. (2022). *Inventario público de glaciares de Chile*. Ministerio de Obras Públicas. Santiago: Dirección General de Aguas. Obtenido de <https://dga.mop.gob.cl/>
- European Space Agency. (2022). *Copernicus Digital Elevation Model (DEM) Product Handbook*. Airbus Defence and Space GmbH. doi:<https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>
- Farias, M., Charrier, R., Comte, D., Martinod, J., Hérail, G., (2005). Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°30'S). *Tectonics*, 24, 1 - 27. doi:<https://doi.org/10.1029/2004TC001667>
- Farías-Barahona, D., Braun, M., Schaefer, M., Sugiyama, S., Rivera, A., Casassa, G., Tabone, I. (2026). QFuego-Patagonia: A comprehensive glacier-related dataset for Patagonia and Tierra del Fuego, South America. *Journal of Glaciology*, 72(14), 1 - 11. doi:[doi:doi:10.1017/jog.2025.10110](https://doi.org/10.1017/jog.2025.10110)

- Fernández, A., Arndt, J., Navas, S. (2024). Mountains as Water Towers. In F. Sarmiento, *Montology* (Vol. 2, pp. 187 - 193). Mountain Lexicon. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-64884-7_25
- Florinsky, I. (2012). *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. (I. o. Biology, Ed.) Pushchino, Russia: Academic Press.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data*, 2(150066). doi:<https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gajardo, R. (1994). *La vegetación natural de Chile: Clasificación y distribución geográfica*. Santiago: Editorial Universitaria.
- Garreaud, R. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3 - 11. doi:<https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., . . . Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6307 - 6327. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>, 2017
- GEO Mountains. (2025). *GEO Mountains c/o Mountain Research Initiative*. Retrieved from <https://geomountains.org/>: <https://geomountains.org/>
- Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA). (2026). *Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA)*. Retrieved from [gmba.unibe.ch/](https://www.gmba.unibe.ch/): <https://www.gmba.unibe.ch/>
- Goodchild, M. (2018). Reimagining the history of GIS. *Annals of GIS*, 24(1), 1 - 8. doi:<https://doi.org/10.1080/19475683.2018.1424737>
- Grohmann, C. (2015). Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Computers & Geosciences*, 77, 111 -117. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.003>
- Guth, P., Van Niekerk, A., Grohmann, C., Muller, J., Hawker, L., Florinsky, I., Strobl, P. (2021). Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. *Remote Sensing*, 13(3581). doi:<https://doi.org/10.3390/rs13183581>
- Haller, A., & Branca, D. (2020). Montología: una perspectiva de montaña hacia la investigación transdisciplinaria y el desarrollo sustentable. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(4), 313 - 332. doi:<https://doi.org/10.18271/ria.2020.193>

- Hock, R., Rasul, G. (2019). High Mountain Areas. In R. Hock, & G. Rasul, *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 131 - 202). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Huggel, C., Carey, M., Clague, J., Käab, A. (2015). *The high-mountain cryosphere: Environmental changes and human risks*. Cambridge University Press. Cambridge University Press.
- Immerzeel, W., Lutz, A., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Yao, T. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577, 364 - 369. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M., Price, M., Ravilious, C., & Butt, N. (2000). *Developing a map of the world's mountain forests: Forests in sustainable mountain development — A state of knowledge report for 2000*. UNEP-WCMC (United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre), Cambridge.
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569 - 574. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.006>
- Körner, C., Paulsen, J., Spehn, E. (2011). A definition of mountains and their bioclimatic belts for global comparisons of biodiversity data. *Alpine Botany*, 121, 73 - 78. doi:<https://doi.org/10.1007/s00035-011-0094-4>
- Körner, C., Urbach, D., Paulsen, J. (2021). Mountain definitions and their consequences. *Alpine Botany*, 131(2), 1 - 5. doi:<https://doi.org/10.1007/s00035-021-00265-8>
- Li, S., Dragicevic, S., Castro, F., Sester, M., Winter, S., Coltekin, A., Cheng, T. (2016). Geospatial big data handling theory and methods: A review and research challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 119 - 133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.012>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile* (2da ed.). Santiago: Editorial Universitaria.
- Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B., Le Quesne, C., Aravena, J. (2006). Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate*, 19, 6334 - 6352. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1>
- Mountain Research Initiative. (2026). Retrieved from mountainresearchinitiative.org/

- Núñez, A., Arenas, F., Sánchez, R. (2017). De la montaña geográfica a las geografías de montaña. Un análisis de Los Andes chileno desde la geografía social. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 105(4). doi:<https://doi.org/10.4000/rga.3791>
- Peel, M. C., Finlayson, B., McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633 - 1644. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pepin, N., Adler, C., Beniston, M., Bradley, R. S., Clow, D., Greenwood, G., Viviroli, D. (2024). Climate change and mountain systems: Global observations, challenges, and future research priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(2), 317 - 339. doi:<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0043.1>
- Pepin, N., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinguer, K., Kotlarski, C., Notarnicola, C., Adler, C. (2022). Climate Changes and Their Elevational Patterns in the Mountains of the World. *Reviews of Geophysics*, 1 - 40. doi:<https://doi.org/10.1029/2020RG000730>
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraër, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424 - 430. doi:<https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Price, M., Byers, A., Friend, D., Kohler, T., Price, L., (2013). *Mountain Geography: Physical and Human Dimensions*. London: University of California Press.
- QFuego-Patagonia. (2024). *QFUEGO-PATAGONIA*. Obtenido de <http://qfuego-patagonia.org/es/inicio/>
- Rahbek, C., Borregaard, M. K., Antonelli, A., Colwell, R. K., Holt, B. G., Nogues-Bravo, D., Fjeldså, J. (2019). Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes. *Science*, 1114 - 1119. doi:<https://doi.org/10.1126/science.aax0151>
- Riley, S., DeGloria, S., & Elliot, R. (1999). A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *International Journal of Science*, 5, 23 - 27.
- Roth, R. (2013). Interactive maps: What we know. *Journal of spatial information science*, 6, 59 - 115. doi: [doi:10.5311/JOSIS.2013.6.105](https://doi.org/10.5311/JOSIS.2013.6.105)
- Sala, S., Lostrangio, M., Zampatti, M., De Luca, G., Landoni, M., & Giorgi, A. (2024). What Governance for Sustainable Development in. *Mountain Research and Development*, 44, 1 - 10. doi:<https://doi.org/10.1659/mrd.2023.00042>

- Sarmiento, F. (2020). Montology manifesto: echoes towards a transdisciplinary science of mountains. *J. Mt. Sci*, 17, 2512 - 2527. doi:<https://doi.org/10.1007/s11629-019-5536-2>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., Meseguer-Ruiz, Ó., (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66 - 73. doi:<https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Sayre, R., Frye, C., Karagulle, D., Krauer, J., Breyer, S., Aniello, P., Cress, J. (2018). A New High-Resolution Map of World Mountains and an Online Tool for Visualizing and Comparing Characterizations of Global Mountain Distributions. *Mountain Research and Development*, 38(3), 240 - 249. doi:<https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00107.1>
- Serra, M., Solorza, R., Aumassanne, C., Salcedo, A., (2025). Geomática aplicada al análisis morfométrico y geomorfológico en cuencas de los Andes áridos. *Boletín Geográfico*, 47, 1 - 29. Retrieved from <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s2313903x/ysyekgmha>
- Shahgedanova, M., Adler, C., Gebrekirstos, A., Grau, R., Huggel, C., Marchant, R., Vuille, M. (2021). Mountain Observatories: Status and Prospects for. *Mountain Research and Development*, 41(2), 1 - 15. doi:<https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00054.1>
- Snethlage, M., Geschke, J., Ranipeta, A., Jetz, W., Yoccoz, N., Körner, C., Urbach, D. (2022). A hierarchical inventory of the world's mountains for global comparative mountain science. *Sci Data*, 9(149). doi:<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01256-y>
- Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *Remote Sens. Spatial Inf. Sci*, 11(4), 71 - 76. doi:<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>
- Thornton, J., Pepin, N., Bradley, R., Adler, C. (2021). Toward a definition of essential mountain climate variables. *Mountain Research and Development*, 41(1), 1 - 13. doi:<https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00054.1>
- Thornton, J., Pepin, N., Shahgedanova, M., Adler, C. (2022). Coverage of in situ climatological observations in the world's mountains. *Frontiers in Climate*, 4. doi:<https://doi.org/10.3389/fclim.2022.814181>
- Ugalde, F., & Ugalde, R. (2025). Movimientos de masas en ambientes criosféricos y su impacto en el paisaje: ejemplos de los Andes Centrales Chilenos. *Revista Geográfica del Sur*, 11(1), 48 - 65. doi:<https://doi.org/10.29393/GS11-4MEFR20004>

Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., Weingartner, R., & . (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(7), 1 - 13.
doi:<https://doi.org/10.1029/2006WR005653>

Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36 - 45.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>

7.2. Fuentes de datos institucionales

ARCLIM. (2024). Atlas de Riesgo Climático de Chile. Ministerio del Medio Ambiente.
<https://arclim.mma.gob.cl>

Banco de Datos de Bienes Nacionales. (2024). Infraestructura de Datos Espaciales de Chile. Ministerio de Bienes Nacionales.
<https://www.geoportal.cl>

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2024). Datos climáticos y herramientas de análisis. Universidad de Chile.
<https://www.cr2.cl>

Copernicus. (2024). Copernicus Digital Elevation Model (GLO-30). European Space Agency.
<https://spacedata.copernicus.eu>

Dirección General de Aguas (DGA). (2022). Inventario Público de Glaciares de Chile. Ministerio de Obras Públicas.
<https://dga.mop.gob.cl>

Datos para la Resiliencia. (2024). Plataforma de Datos para Adaptación y Resiliencia Climática. Ministerio del Medio Ambiente.
<https://datos.mma.gob.cl>

Earth Data NASA. (2024). NASA Earth Data Portal. National Aeronautics and Space Administration.
<https://earthdata.nasa.gov>

EOS Data Analytics. (2024). EOS Platform for Satellite Data Analysis.
<https://eos.com>

Google Earth Engine. (2024). Google Earth Engine Data Catalog. Google.
<https://earthengine.google.com>

IDE Chile. (2024). Infraestructura de Datos Espaciales de Chile. Ministerio de Bienes Nacionales.
<https://www.geoportal.cl>

IDE Minagri. (2024). Infraestructura de Datos Espaciales Ministerio de Agricultura.
<https://ide.minagri.gob.cl>

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2024). Geodatos Censo 2024.
<https://geoine-ine-chile.opendata.arcgis.com>

Ministerio del Medio Ambiente. (2024). Sistema de Información de Biodiversidad (SIMBIO).
<https://simbio.mma.gob.cl>

Ministerio del Medio Ambiente. (2024). Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE).
<https://areasprotegidas.mma.gob.cl>

Ministerio del Medio Ambiente. (2024). SIG Humedales Urbanos.
<https://sig.mma.gob.cl>

Ministerio del Medio Ambiente. (2024). Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Forestales (SIMEF).
<https://simef.mma.gob.cl>

MODIS NASA. (2024). MODIS Land Surface Temperature (MOD11A2). NASA.
<https://lpdaac.usgs.gov>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2024). Sistema de Información Territorial Agropecuaria.
<https://www.odepa.gob.cl>

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2024). Geoportal SERNAGEOMIN.
<https://www.sernageomin.cl>

Sentinel Hub. (2024). Copernicus Sentinel Data Access. European Space Agency.
<https://www.sentinel-hub.com>

Sistema Regional de Información e Indicadores Territoriales (SRIIT). (2024). Gobierno Regional del Biobío.
<https://sriit.gob.cl>

Sistema de Información Territorial Rural (CIREN). (2024). Centro de Información de Recursos Naturales.
<https://sit.ciren.cl>

Comisión Nacional de Riego (CNR). (2024). Infraestructura de Datos Espaciales CNR.
<https://www.cnr.gob.cl>

USGS Earth Explorer. (2024). United States Geological Survey Satellite Imagery.
<https://earthexplorer.usgs.gov>